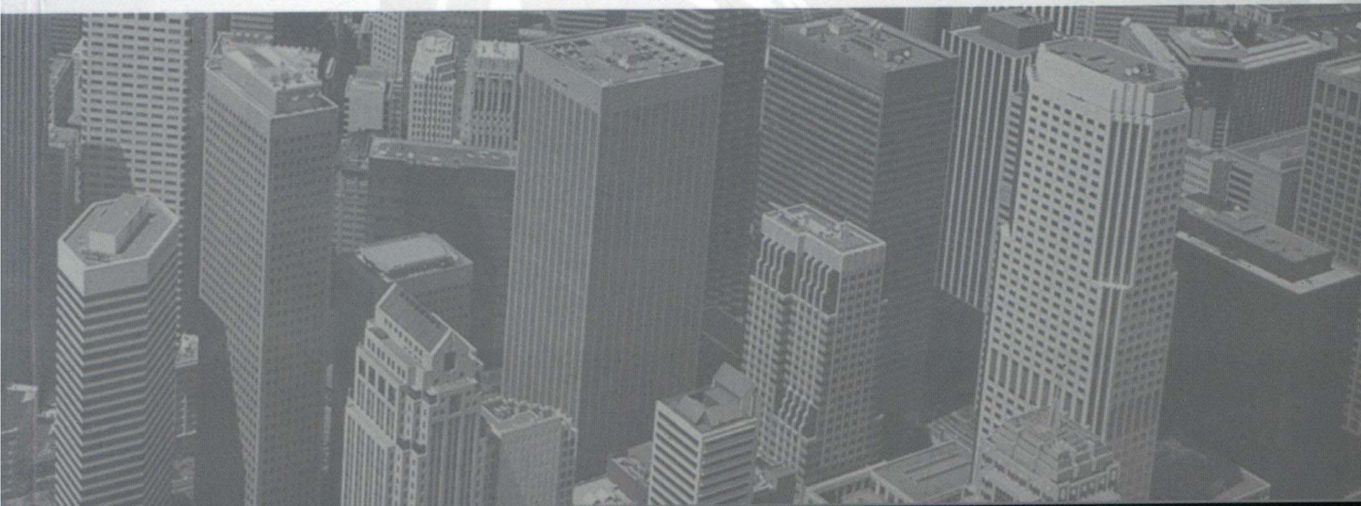
BACnet标准与楼宇自控系统技术

张少军◎编著





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

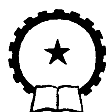


VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

BACnet 标准与楼宇自控系统技术

张少军　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书对 BACnet 标准、楼宇自控技术的应用做了较全面、深入和系统的论述，理论体系严谨、完整。

内容主要包括：工控领域和楼控领域的控制网络技术；BACnet 标准概述；BACnet 协议的体系结构和应用层；BACnet 的网络层、物理层和数据链路层；BACnet/IP 网络；BACnet 标准与 PTP 及 MS/TP 网络；BACnet 标准与 LON 及 ARCnet；BACnet 标准与以太网；工业以太网与实时以太网；楼宇自控系统及技术；系统集成；BACnet 网关以及 BACnet 网络与异构网的互联；应用系统举例及分析；BACnet 技术的发展和技术融合等。

本书可作为建筑类高等院校的建筑电气与智能化、电气工程与自动化、自动化、电气工程、机械电子工程专业的教材。对于建筑行业的相关专业和涉及建筑智能化、信息化技术相关专业企业的工程技术人员、设计人员、大学生、研究生和管理人员学习和应用建筑智能化技术、信息化技术具有较高的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

BACnet 标准与楼宇自控系统技术/张少军编著. —北京：机械工业出版社，2012.5

ISBN 978-7-111-38144-0

Ⅰ. ①B… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①智能化建筑-自动控制系统 Ⅳ. ①TU855

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 077660 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：林春泉 责任编辑：顾 谦 版式设计：霍永明
责任校对：张晓蓉 封面设计：路恩中 责任印制：乔 宇
三河市国英印务印刷厂印刷

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 25.25 印张 · 706 千字
0001— 3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-38144-0
定价：68.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

前　　言

产业的发展一点不能离开系统性理论的支持，系统性理论能够为产业的发展提供一个明晰的方向，并为产业发展解决许多重大的关键问题。传统的智能建筑技术在许多重要的方面并没有系统性的理论作为支撑，表现在：构建楼宇自控系统（BAS）的控制网络在体系上有些混乱；不同的楼控系统中的核心部件不能彼此互换互用和互连互通，即楼控系统的开放性不好；实际运行的楼控系统的性能和节能指标与设计要求相距较大等。在建筑智能化技术中，传统的方法是将信息技术或控制理论和控制工程中的许多理论方法直接移植到建筑领域中来。随着楼宇自动控制系统在发展和应用中表现出越来越多的问题来看，不去系统地构建它的理论体系已经形成了阻碍楼宇自控技术和建筑智能化技术发展的瓶颈。因此，建筑智能化、信息化技术的发展也包括了建立关于楼宇自动化和智能化控制技术系统性理论的任务。这些系统性理论涉及的方面较多，其中：深入研究和应用 BACnet（楼宇自动控制网络）标准及 BACnet 应用系统；随着新技术的发展，修正和完善 BACnet 标准及 BACnet 应用系统技术，继续提高 BAS 开放性、互操作性等也是系统性理论中非常重要的组成部分。

BACnet 是架构楼控系统的基础，楼控系统的性能、楼控系统的开放性和互操作性能、楼控系统的性价比、系统的简约程度、系统日后的升级改造和维护保养都和 BACnet 有密切的关系。因此，规划、设计和使用一个 BAS，首先要规划设计一个适合具体应用环境、性价比高、开放性好、便于系统集成、既满足各种应用需求，又经济实用、便于日后系统升级改造和维护保养的 BAS。

不同的 BAS 使用了不同的通信协议和标准，如 BACnet 标准、LonTalk 协议、TCP/IP 等全局性的通信协议或标准，在不同的控制层又使用多种局部性的通信协议和标准，构成不同的通信协议组态。通信协议或组态的选择和使用，对系统的开放性、互操作性以及以后的系统集成影响很大。如在应用系统的开放性、互操作性和大范围内优良的系统集成方面，BACnet 应用系统明显地优于 LonTalk 应用系统，当然，LonTalk 应用系统在较狭义的系统范围内具有很好的开放性、互操作性。

BACnet 标准的颁布实施距今已经有 17 年了。楼宇自控技术在发展、控制理论与控制工程技术在发展，计算机控制技术在发展，还有与楼宇自控技术关系极为密切的现代计算机网络、现代通信技术都在迅速地发展，在今天，对 BACnet 标准的内容、应用情况、与新技术的融合以及为适应新形势的发展必须要做出的修正和改进，重新地做出审视是十分有必要的，对建筑智能化、信息化技术的发展是有重大意义的。本书就是在这样的背景下，对 BACnet 标准的内容、发展、应用现状以及和许多新出现并且发展迅速技术的关系及融合；BACnet 标准与 BAS 的关系；对 BACnet 标准发展面临的修正提出自己的看法，有些观点非常希望和业界继续深入具体商榷。

本书的内容主要包括：工控领域和楼控领域的控制网络技术；BACnet 标准概述；BACnet 协议的体系结构和应用层；BACnet 网络层、物理层和数据链路层；BACnet/IP 网络；BACnet 标准与 PTP 及 MS/TP 网络；BACnet 标准与 LON 及 ARCnet；BACnet 标准与以太网；工业以太网与实时以太网；BAS 及技术；系统集成；BACnet 网关以及 BACnet 网络与异构网的互联；应用系统举例及分析；BACnet 技术的发展和技术融合等。

有这样一个问题值得业界给予重视和关注：由于建筑智能化、信息化技术在技术体系上呈现一个交叉性很强和不同技术互相融合的特点，因此到现在为止，还没有真正建立起一个结构体系严密和完整的理论体系，相关的设计、施工和工程验收规范标准也还没有建立起一个完整的体系；尤其在 BACnet 的内容上，传统的控制总线、现场总线、工业以太网及实时以太网等标准及技术应用情况繁杂，缺少系统化理论支撑。目前，国内很多高等院校已经开设了建筑电气与智能化专业，因此建立起关于 BAS、建筑智能化、信息化系统性理论是业界内研究人员共同面对的任务。

本书的撰写依托于北京建筑工程学院“建筑电气与智能化技术实验示范中心”中先进的楼宇智能化控制实验教学系统。

本书是北京建筑工程学院专著基金支持出版的项目，鉴于学校对建筑电气与智能化学科建设发展以及对本书出版的大力支持，本人在此表示感谢。

本书是建筑电气与智能化技术专著教材群的组成部分。这套专著教材群包括：①《建筑智能化信息化技术》；②《变风量空调技术》；③《以太网技术及在楼宇自控系统中的应用》；④《无线传感器网络技术及应用》（建筑行业特色较为明显）；⑤《建筑智能化技术素材图库及快速绘图》；⑥《智能建筑理论与工程实践》；⑦《计算机网络与通信》（建筑行业用)》；⑧《楼宇自动化及智能控制技术》；⑨《BACnet 标准与楼宇自控系统技术》；⑩《现代建筑楼宇自控及网络工程案例分析》。

本书的“第 10 章 BAS 及技术”由北京建筑工程学院电信学院的周渡海高级工程师和张少军教授共同撰写，其余部分均由张少军编写。

本书由于编写时间仓促，难免有一些错误和缺点，恳请广大读者批评指正。

未经许可，不得复制和抄袭本书部分或全部内容。违者必究。

作者

2012 年 5 月 18 日

目　　录

前言
缩略语
第 1 章　工控领域和楼控领域的控制网络技术 …… 1
1.1　工控领域控制网络的发展及主要特点 …… 1
1.1.1　控制网络技术的发展 …… 1
1.1.2　控制网络的主要特点 …… 3
1.2　控制网络和信息网络的主要区别及常用的控制网络 …… 4
1.3　传统的控制总线 …… 6
1.3.1　RS-232 总线 …… 6
1.3.2　RS-485 总线 …… 8
1.4　现场总线 …… 9
1.4.1　什么是现场总线及主要种类 …… 9
1.4.2　PROFIBUS …… 11
1.4.3　LonWorks 总线技术 …… 13
1.4.4　ModBus …… 16
1.4.5　CAN 总线网络 …… 17
1.4.6　EIB …… 19
1.4.7　CEBus …… 22
1.5　工业以太网与实时以太网 …… 23
1.5.1　工业以太网及其特点 …… 23
1.5.2　工业以太网作为控制网络的技术优势 …… 24
1.5.3　实时以太网 …… 25
1.5.4　灵活组织控制网络的架构 …… 26
1.5.5　关于实时以太网的 IEC 61784-2 标准 …… 26
1.6　BACnet 标准支持的控制网络 …… 26
1.6.1　楼宇自控系统通信网络架构 …… 26
1.6.2　BACnet 支持的控制网络 …… 28
1.7　楼宇自控系统中常用控制网络和底层控制网络的选择 …… 28
1.7.1　楼宇自控系统中常用的控制网络 …… 28
1.7.2　底层控制网络的选择 …… 28
第 2 章　BACnet 标准概述 …… 29
2.1　BACnet 标准 …… 29
2.1.1　BACnet 标准的推出 …… 29
2.1.2　BACnet 标准的推广 …… 29
2.1.3　采用 BACnet 标准构建 BAS 的优点 …… 30
2.2　SPC 135P 及工作组 …… 31
2.3　BACnet 标准的主要组成内容和概要 …… 32
2.3.1　BACnet 标准的主要组成内容 …… 32
2.3.2　BACnet 标准概要 …… 38
2.4　国际和国内推广 BACnet 标准的组织 …… 43
2.4.1　ASHRAE SSPC 135 委员会 …… 43
2.4.2　BACnet International …… 43
2.4.3　BACnet Interest Group Europe (BIG-EU) …… 43
2.4.4　Caba …… 44
2.4.5　IPC …… 44
2.4.6　PCI-SIG …… 44
2.4.7　ARCnet Trade Association (ATA) …… 44
2.4.8　BMA-BACnet 制造商协会 …… 44
2.4.9　国内的相关组织 …… 44
2.4.10　国内近两年来开展关于 BACnet 标准技术交流的情况 …… 45
2.5　BACnet 认证和 BTL 测试 …… 46
第 3 章　BACnet 协议的体系结构和应用层 …… 48
3.1　OSI 七层参考模型和 BACnet 简化体系结构的提出 …… 48
3.1.1　OSI 七层参考模型及各层级数据的组织形式 …… 48
3.1.2　BACnet 简化体系结构的提出 …… 51
3.2　BACnet 简化的体系结构和支持的局域网 …… 52
3.2.1　BACnet 简化的体系结构和各层功能 …… 52
3.2.2　BACnet 标准支持的局域网 …… 53
3.3　BACnet 网络中的一些基本组件 …… 54
3.3.1　BACnet 网络中的物理网段、网段和网桥 …… 54
3.3.2　节点、半路由器和路由器 …… 54
3.4　BACnet 网络的拓扑结构 …… 55
3.5　应用层 …… 57

3. 5. 1　应用层的模型 ………………………… 57
3. 5. 2　有证实的应用层服务和无证实的应用层服务 ………………………… 59
3. 5. 3　BACnet 报文的分段 ……………… 59
3. 5. 4　BACnet APDU 的传输 ……………… 60
3. 5. 5　应用层协议状态机 ………………… 63
3. 5. 6　BACnet 对象 ……………………… 66
3. 5. 7　BACnet 标准的应用层服务 ……… 70
3. 5. 8　应用层协议时序图 ………………… 72
第 4 章　BACnet 的网络层、物理层和数据链路层 ………………………… 77
4. 1　BACnet 网络层功能及对网络层的说明 ……………………………………… 77
4. 1. 1　BACnet 网络层功能 ……………… 77
4. 1. 2　BACnet 网络层与 TCP/IP 网络层的区别 ……………………………… 77
4. 2　BACnet 网络层服务与 PDU 结构 ……… 80
4. 2. 1　BACnet 网络层服务 ……………… 80
4. 2. 2　BACnet 网络层 PDU 结构 ………… 81
4. 3　网络层协议报文和运行规程 …………… 82
4. 3. 1　网络层协议报文 …………………… 82
4. 3. 2　网络层协议运行规程 ……………… 83
4. 4　BACnet 路由器 ………………………… 85
4. 4. 1　路由表和路由表的管理方式 ……… 86
4. 4. 2　路由器的运行和路由器流量控制 ……………………………………… 86
4. 4. 3　一种 BACnet 路由器产品 ………… 87
4. 5　BACnet 数据链路和物理层规范 ……… 88
4. 5. 1　BACnet 数据链路/物理层支持和自定义的局域网技术 ……………… 88
4. 5. 2　BACnet 的以太网规范 …………… 88
4. 5. 3　BACnet 的 ARCnet 局域网规范 …… 89
4. 5. 4　MS/TP 局域网规范 ………………… 90
4. 5. 5　BACnet 网络架构 ………………… 94
第 5 章　BACnet/IP 网络 ………………… 95
5. 1　IP 网络与 BACnet/IP 互联协议的提出 ……………………………………… 95
5. 1. 1　TCP/IP 体系中的 IP ……………… 95
5. 1. 2　BACnet/IP 网络的互联与 BACnet/IP 互联协议的提出 …………………… 99
5. 2　B/IP PAD 技术 ………………………… 100
5. 2. 1　B/IP PAD 技术（隧道技术）的基本原理 ………………………… 100
5. 2. 2　B/IP PAD 的实现结构 …………… 100
5. 3　BACnet/IP 网络 ………………………… 102
5. 3. 1　BACnet/IP 互联网 ………………… 103
5. 3. 2　BVLL 协议 ………………………… 106
5. 3. 3　BBMD 和 FD ……………………… 108
5. 3. 4　BACnet/IP 网络互联及路由器 …… 111
5. 3. 5　BACnet/IP 和 BACnet 设备的混合网络 ………………………………… 113
第 6 章　BACnet 标准与 PTP 及 MS/TP 网络 ………………………………… 116
6. 1　MS/TP 控制总线 ……………………… 116
6. 1. 1　MS/TP 协议 ……………………… 116
6. 1. 2　MS/TP 控制总线的基本组网方式 ……………………………………… 116
6. 1. 3　接收数据帧状态机和 Master 节点状态机 ………………………………… 118
6. 1. 4　BACnet 数据包接收、发送和提高 BACnet MS/TP 设备数据访问速度 ……………………………………… 119
6. 1. 5　MS/TP 网络物理层中的 RS-485 总线 ……………………………………… 119
6. 1. 6　一个在 MCU 中实现的 BACnet-MS/TP 协议软件框架 ……………… 122
6. 2　PTP 网络 ……………………………… 123
6. 2. 1　BACnet PTP 通信 ………………… 123
6. 2. 2　BACnet PTP 通信的服务规范 …… 123
6. 2. 3　PTP 的数据链路帧格式 ………… 124
第 7 章　BACnet 标准与 LON 及 ARCnet 网络 ………………………………… 126
7. 1　LonWorks 网络 ………………………… 126
7. 1. 1　LonWorks 技术的主要组成 ……… 126
7. 1. 2　LonTalk 协议 ……………………… 127
7. 1. 3　Neuron 神经元芯片 ……………… 137
7. 1. 4　收发器 …………………………… 139
7. 1. 5　LonWorks 节点技术 ……………… 140
7. 1. 6　Neuron C 语言 …………………… 141
7. 1. 7　I/O 对象 ………………………… 145
7. 1. 8　网络变量 ………………………… 146
7. 1. 9　LON 网络 ………………………… 148
7. 1. 10　LonWorks 总线网络在 BAS 中的应用 ………………………………… 152
7. 1. 11　LonWorks 总线网络与 Internet 的互联 ………………………………… 152
7. 1. 12　i. LON 600 LonWorks/IP 服务器 ………………………………… 153

7.1.13　计算机网络与 LonWorks 控制网络的比较 …… 154
7.1.14　LonWorks 系统的设计 …… 154
7.1.15　LonWorks 网络控制技术系统开发实例 …… 157
7.2　ARCnet …… 162
7.2.1　ARCnet 概述 …… 162
7.2.2　ARCnet 逻辑环建立和数据的接收与发送 …… 163
7.2.3　ARCnet 的实时性 …… 164
7.2.4　数据链路层 …… 166
7.2.5　ARCnet 网卡和集线器 …… 168
7.2.6　ARCnet 的网络结构和最大网络长度 …… 168
第 8 章　BACnet 标准与以太网 …… 171
8.1　以太网的标准系列 …… 171
8.1.1　IEEE 802 标准系列 …… 171
8.1.2　IEEE 802.3 以太网标准 …… 172
8.2　典型以太网技术 …… 173
8.2.1　10Base-T 网络 …… 173
8.2.2　10Base-F 网络 …… 174
8.2.3　IEEE 802.3u 快速以太网 …… 174
8.2.4　千兆位以太网 …… 177
8.3　从标准以太网、快速以太网到千兆位以太网的升级 …… 180
8.3.1　网络环境需要更高的带宽 …… 180
8.3.2　交换机到交换机连接信道的升级 …… 180
8.3.3　交换机到服务器连接信道的升级 …… 180
8.3.4　对交换式快速主干以太网的升级 …… 181
8.3.5　网络升级的一些注意事项 …… 181
8.3.6　从标准和快速以太网向千兆位以太网升级的举例 …… 181
8.4　以太网与楼宇自控网络 …… 182
8.4.1　以太网进入工控和楼宇自控领域 …… 182
8.4.2　实现千兆位以太网的方法和用于工业控制及工业环境中的千兆位以太网 …… 185
8.5　万兆位以太网 …… 186
8.5.1　万兆位以太网的技术特点 …… 187
8.5.2　10000Base-ER 和 10000Base-EW …… 187
8.5.3　10000Base-LR、10000Base-L4、10000Base-SR …… 187
8.5.4　10000Base-SW …… 188
8.5.5　万兆位以太网物理层标准和组网距离 …… 188
8.5.6　万兆位以太网的应用 …… 189
8.6　以太网信号帧结构 …… 189
8.7　物理层中数据的组织形态 …… 192
8.8　全双工交换式以太网 …… 193
8.8.1　交换式以太网 …… 193
8.8.2　全双工交换式以太网 …… 194
第 9 章　工业以太网与实时以太网 …… 197
9.1　工业以太网与实时以太网概述 …… 197
9.1.1　工业网络 …… 197
9.1.2　以太网、工业以太网和实时以太网 …… 197
9.1.3　关于现场总线和实时以太网的 IEC 61158 标准 …… 198
9.1.4　工业以太网与普通商用以太网产品 …… 199
9.1.5　工业以太网的速度和覆盖距离 …… 200
9.1.6　全双工及自动协商 …… 200
9.1.7　一个工业以太网控制系统 …… 201
9.2　设计和实现工业以太网应用系统要考虑的部分因素 …… 202
9.2.1　传输介质与拓扑结构 …… 202
9.2.2　以太网和控制网络的集成及硬件设备可靠性解决方案 …… 203
9.3　关于工业以太网和实时以太网技术的问题 …… 203
9.4　Ethernet/IP …… 205
9.4.1　Ethernet/IP 通信协议模型 …… 205
9.4.2　Ethernet/IP 实时以太网系统结构 …… 207
9.5　PROFINET …… 208
9.5.1　PROFINET 简介 …… 208
9.5.2　PROFINET 通信协议模型 …… 208
9.5.3　PROFINET 技术中的部分重要概念 …… 209
9.5.4　PROFINET 组网拓扑和子网 …… 211
9.5.5　PROFINET 网络接口的技术规范 …… 211
9.5.6　优化的 PROFINET 网络 …… 212
9.5.7　PROFINET 技术应用实例 …… 213
9.6　EtherCAT …… 215

9.6.1　EtherCAT 系统的结构 …………… 216
9.6.2　EtherCAT 网络中的主站、从站和通信协议模型 ……………………… 217
9.6.3　EtherCAT 网络拓扑结构和传输介质 ……………………………… 218
9.6.4　EtherCAT 技术特点 ……………… 219
9.7　EPA ……………………………………… 220
9.7.1　EPA 标准 ……………………… 220
9.7.2　EPA 通信协议和系统结构 ……… 221
9.7.3　互通信与互操作 ………………… 223
9.7.4　开放性与安全 …………………… 223
9.8　ModBus/TCP …………………………… 224
9.8.1　ModBus/TCP 工业以太网协议概述 ……………………………… 224
9.8.2　ModBus/TCP 数据帧 ……………… 224
9.8.3　ModBus/TCP 网络的体系结构及通信 ……………………………… 224
9.9　工业以太网监控系统的结构 ………… 226
9.9.1　C/S 结构 ……………………… 226
9.9.2　B/S 结构 ……………………… 226
9.9.3　B/S 与 C/S 相结合的体系结构 … 227
9.10　工业以太网的部分主要设备 ………… 227
9.10.1　一个工业以太网的解决方案 …… 227
9.10.2　工业以太网供电 PoE 交换机 …… 228
9.10.3　部分工业以太网 PoE 设备和终端 ……………………………… 229
9.10.4　工业以太网网关 ………………… 229
9.10.5　工业以太网中的交换机 ………… 230
9.10.6　工业以太网中的路由器 ………… 232
9.11　工业 IP 视频监控 …………………… 232
9.12　一些工业以太网的比较 ……………… 233
9.13　TCP/IP 与现场总线通信协议结构的比较 ……………………………… 234
9.14　工业以太网的规划安装调试 ………… 235
9.14.1　工业以太网和商用以太网的主要区别 ………………………… 235
9.14.2　MICE 环境参数和结构化布线标准 ……………………………… 236
9.14.3　工业以太网的网络结构和虚拟局域网 ……………………………… 237
9.14.4　规划和组建一个工业以太网要考虑的问题 ……………………… 238
第 10 章　BAS 及技术 ………………………… 242
10.1　BAS 基础知识 ……………………… 242
10.1.1　BAS 的功能和特点 ……………… 242
10.1.2　BAS 的组成和监控对象 ………… 243
10.1.3　BAS 中的传感器和执行机构 …… 244
10.1.4　DDC 功能和结构 ………………… 250
10.2　中央空调系统的冷源 ………………… 252
10.2.1　中央空调及冷源 ………………… 252
10.2.2　冷水机组的分类及运行原理 …… 252
10.2.3　制冷站的自动监测与控制 ……… 254
10.3　中央空调热源系统 …………………… 259
10.3.1　热网和自备热源 ………………… 259
10.3.2　电热锅炉的运行及控制 ………… 260
10.3.3　热交换器及控制 ………………… 260
10.4　新风机组及控制 ……………………… 261
10.4.1　新风机组的控制原理和运行状态及参量监控 ……………………… 261
10.4.2　新风机组运行控制与节能控制 ……………………………… 262
10.5　空调机组及自动控制 ………………… 263
10.5.1　空调机组的安装位置关系 ……… 263
10.5.2　四管制空调机组的工作原理 …… 264
10.5.3　定风量空调机组运行状态及参量监控 ……………………………… 265
10.5.4　定风量空调机组的运行控制与节能运行 ………………………… 266
10.6　风机盘管系统及控制 ………………… 267
10.6.1　风机盘管空调系统的工作原理 ……………………………… 267
10.6.2　风机盘管加新风系统 …………… 269
10.7　变风量空调系统 ……………………… 270
10.7.1　变风量空调系统简介 …………… 270
10.7.2　VAV 空调系统组成 ……………… 271
10.7.3　VAV 空调机组的末端装置（VAVBOX） …………………… 271
10.7.4　VAV 空调系统基本原理 ………… 272
10.7.5　VAV 空调系统分类 ……………… 273
10.7.6　VAV 空调系统特点 ……………… 276
10.7.7　一个典型的 VAV 空调机组控制 ……………………………… 276
10.7.8　VAV 空调系统运行状态及参量监控 ……………………………… 276
10.7.9　VAV 空调系统运行与节能控制 ……………………………… 277
10.7.10　变风量空调系统的设计 ……… 279
10.8　通风系统自动控制 …………………… 282
10.9　空调房间热负荷和湿负荷计算及新风量确定 ………………………… 282

10.9.1 空调房间热负荷及计算 ………… 282
10.9.2 湿负荷及计算 …………………… 284
10.9.3 空调房间送风量的确定和空调系统新风量的确定 ……………… 285
10.10 BAS设计的基础知识 …………… 286
10.10.1 BAS设计的范围和系统规模确定 ………………………… 286
10.10.2 通信网络设计 ………………… 286
10.10.3 控制点规划 …………………… 287
10.10.4 中央管理机设计 ……………… 287
10.10.5 现场分站设计 ………………… 287
10.10.6 空调冷热水系统的一些参数设置 ………………………… 288
10.10.7 中控室 ………………………… 289
10.11 PID控制…………………………… 290
10.11.1 比例调节、积分调节和微分调节 ………………………… 290
10.11.2 连续控制系统中的PID控制 … 292
10.11.3 比例调节器的比例带 ………… 293
10.11.4 三种调节作用的关系 ………… 293
10.11.5 闭环控制和位式调节器 ……… 294
10.12 中央空调系统各子系统的设计要点 ……………………………… 296
10.12.1 冷水机组控制系统设计要点 … 296
10.12.2 新风机组、空调机组及风机盘管控制设计要点 …………… 296
10.13 部分典型BAS的软硬件架构 ……… 297
10.13.1 卓灵BAS ……………………… 297
10.13.2 施耐德TAC BAS ……………… 299
10.13.3 METASYS BAS ……………… 302
10.13.4 BACtalk BAS ………………… 304
10.13.5 西门子Apogee BAS ………… 308
第11章 系 统 集 成……………………… 314
11.1 BAS集成概述 ………………………… 314
11.1.1 BAS的系统集成 ………………… 314
11.1.2 系统集成概念的扩充 …………… 315
11.2 系统集成的特点和系统集成的基本思想 ……………………………… 316
11.2.1 系统集成的特点 ………………… 316
11.2.2 系统集成的基本思想 …………… 316
11.2.3 BAS集成的步骤 ………………… 317
11.3 系统网络结构设计和系统集成的水平层次 ……………………………… 317
11.3.1 系统网络结构设计 ……………… 317
11.3.2 系统集成的水平层次 …………… 318
11.3.3 系统集成的信息流及信息单元矩阵描述 ………………………… 318
11.4 BAS集成的技术模式 ………………… 320
11.4.1 以BMS为中心的集成模式 …… 320
11.4.2 采用BACnet或LonWorks技术的模式 ………………………… 320
11.4.3 直接在以太网环境下进行系统集成 ………………………… 320
11.4.4 采用数据库集成模式 ………… 321
11.4.5 采用OPC技术及ODBC技术实现智能建筑系统集成 ……………… 321
11.5 BACnet体系下的系统集成 ………… 322
11.5.1 BACnet体系在系统集成中具有的优势 ………………………… 322
11.5.2 BACnet系统集成方法…………… 323
11.6 智能楼宇系统集成工程应用实例 …… 325
11.6.1 某标志建筑的智能化系统集成工程 ………………………… 325
11.6.2 某大厦建筑智能化管理系统中的系统集成案例 ……………… 326
11.7 智能楼宇系统集成的部分问题探讨 ………………………………… 328
11.7.1 系统集成的一些新特点 ………… 329
11.7.2 使用以太网架构系统的集成技术正在迅速发展 ……………… 329
11.7.3 中间件技术在系统集成中的重大作用 ………………………… 330
第12章 BACnet网关以及BACnet网络与异构网的互联 ………… 331
12.1 BACnet网络的互操作域 …………… 331
12.1.1 描述设备的通用方式和分层级的体系结构 ………………………… 331
12.1.2 BACnet的互操作模型…………… 331
12.2 BACnet网关 ………………………… 333
12.2.1 BACnet网关的主要作用………… 333
12.2.2 一种支持BACnet总线的无线传感器网关 ……………………… 334
12.2.3 LonWorks网络与BACnet网关 … 334
12.2.4 ModBus与BACnet MS/TP互联的网关主要技术参数 ……………… 336
12.3 部分网关产品及性能参数 ………… 337
12.3.1 RogerweⅡ网关（通信协议转换器PC-GATEWAY） ……………… 337
12.3.2 EIB转BACnet/IP网关 ………… 338
12.3.3 ModBus RTU转LonWorks

网关 ………………………………… 338
12.3.4 ModBus 转 BACnet/IP 网关……… 339
12.3.5 ModBus 转 BACnet MS/TP 网关 ………………………………… 339
12.4 BACnet 与蓝牙网络的互联互通 …… 340
12.5 关于 BACnet 网关的开发 …………… 343
12.5.1 BACnet 网关……………………… 343
12.5.2 BACnet 网关开发中的程序调试 ………………………………… 343
第 13 章 应用系统举例及分析 ………… 345
13.1 BACnet 系统的说明和设计 ………… 345
13.2 应用 BACnet 协议的控制器产品举例 ……………………………………… 346
13.2.1 Delta 的 ORCA 系列产品和应用 ………………………………… 346
13.2.2 CornfortPoint 控制器及 BAS 的组织 ………………………………… 347
13.3 BACnet 标准在冷水机组群控方面的应用 ……………………………………… 350
13.3.1 系统组成 ………………………… 350
13.3.2 地址、设备编号与冷水机组内部参数表 ……………………………… 350
13.3.3 地址和通信接口绑定 …………… 351
13.3.4 有效的群控方法 ………………… 352
13.4 BACnet 应用系统中的无线传感器网络 ……………………………………… 352
13.4.1 无线传感器网络 ………………… 352
13.4.2 ZigBee 网络与 BACnet 的互联 … 354
13.4.3 ZigBee 网络在 BACnet 系统中的扩展应用 ………………………… 354
13.5 基于 BACnet/Web Services BAS …… 356
13.5.1 Web 技术和 XML ……………… 356
13.5.2 XML-Web Services ……………… 360
13.5.3 Web 集成技术 …………………… 361
第 14 章 BACnet 技术的发展和技术融合 ………………………………… 363
14.1 现代建筑中的通信网络覆盖和网络融合 ……………………………………… 363
14.1.1 现代建筑中的通信网络覆盖 …… 363
14.1.2 网络融合 ………………………… 364
14.2 信息域网络与测控网络的互联互通 ……………………………………… 365
14.3 短距离无线网络的互联互通 ………… 368
14.3.1 楼宇自控网络选择 ……………… 368
14.3.2 什么是短距离无线网络的互联互通 ………………………………… 368
14.3.3 应用方向及前景 ………………… 370
14.4 构建楼宇自控网络的优化模式 ……… 371
14.4.1 现有楼宇自控网络的结构特点及不足 ………………………………… 371
14.4.2 现有楼宇自控网络的结构缺欠 ………………………………… 372
14.4.3 架构楼宇自控网络的模式选择 ………………………………… 375
14.4.4 优化的楼宇自控网络模式及组织 ………………………………… 376
14.5 BACnet 标准支持的楼宇自控网络的比较 ……………………………………… 378
14.5.1 性价比排序 ……………………… 378
14.5.2 ISO 8802.3 局域网的优、缺点 ………………………………… 378
14.5.3 选用 ARCnet 的考虑 …………… 379
14.5.4 选用 MS/TP 网络的考虑 ……… 379
14.5.5 选用 LON 网络的考虑 ………… 379
14.6 BACnet 标准与 IPv6 ……………… 380
14.6.1 IPv6 的地址结构和地址配置 …… 380
14.6.2 IPv6 地址体系结构 ……………… 381
14.6.3 IPv4 向 IPv6 的过渡 …………… 382
14.6.4 新技术对网络地址资源的需求和 IPv6 ……………………………… 384
14.6.5 BACnet 标准与 IPv6 …………… 385
14.7 关于 BACnet 标准有待商榷的问题 … 386
参考文献 ………………………………………… 389

缩　略　语

A　应用层（前缀）
AE　应用实体
ANSI　美国国家标准学会
APCI　应用层协议控制信息
API　应用编程接口
ARCnet　附加资源计算机网络
ASE　应用层服务单元
ASN. 1　抽象句法结构符号 1（ISO 8824）
B''　表示在单引号之间使用二进制符号
BAC　楼宇自动控制
CNF　证实原语
COV　值的改变
CRC　循环冗余码校验
D''　表示在单引号之间使用十进制符号
DA　本地目标 MAC 层地址
DADR　最终目标 MAC 层地址
DER　需要应答的数据
DES　数据加密标准（FIPS 46-1）
DID　ARCnet 目标 MAC 地址
DLEN　最终目标 MAC 层地址的一个字节长度
DNET　两个字节表示的最终目标的网络号码
DSAP　LLC 目标服务访问点（对于 BACnet 为 X'82'）
EXEC　执行一个服务请求的能力
ICI　接口控制信息
IND　指示原语
IEEE　美国电气和电子工程师学会
INIT　发起一个服务请求的能力
ISO　国际标准化组织
L　数据链路层（前缀）
LAN　局域网
LLC　逻辑链路控制（ISO 8802. 2）
LPCI　链路层协议控制信息
LPDU　链路层协议数据单元
LSAP　链路层服务访问点（对于 BACnet 为 X'82'）
LSDU　链路层服务数据单元
M　命令的
M（=）　命令的（参数与服务原语中左边的参数在语义上相等）
MA　媒体访问（前缀）
MAC　媒体访问控制
MPCI　MAC 层协议控制信息
MPDU　MAC 层协议数据单元
MSDU　MAC 层服务数据单元
MS/TP　主从/令牌传递
N　网络层（前缀）
NP　网络优先权
NPCI　网络层协议控制信息
NPDU　网络层协议数据单元
NRZ　反向不归零制
NSAP　网络层服务访问点
NSDU　网络层服务数据单元
O　表明对某个属性的支持是可选的
OSI　开放系统互联
P　物理层（前缀）
PAC　ARCnet 数据分组的头字节
PCI　协议控制信息
PDU　协议数据单元
PICS　协议实现一致性声明
PK　私有密钥
PPCI　物理层协议控制信息
PPDU　物理层协议数据单元
PSDU　物理层服务数据单元
PTP　点对点
R　表明对某个属性是支持的，并且用 BACnet 设备可读该属性
REQ　请求原语
RSP　响应原语
S　选择
S(=)　选择（参数与服务原语中左边的参数在语义上相等）
SA　本地网络资源的 MAC 层地址
SAP　服务访问点
SC　ARCnet 系统代码（对于 BACnet 为 X'CD'）
SDU　服务数据单元
SID　ARCnet 源的 MAC 层地址

SK　会话密钥
SLEN　源节点的 MAC 层地址的一个字节长度
SNET　两个字节表示的源节点网络号码
SPC　标准工程委员会
SSAP　LLC 源节点服务访问点（对于 BACnet 为 X8'2'）
TSM　事务处理状态机
U　用户选项
U（=）　用户选项（参数与服务原语中左边的参数在语义上相等）
UART　通用异步收发器
VT　虚拟终端
W　表明对某个属性是支持的，并且用 BACnet 设备可读和可写该属性
X''　表示在单引号之间使用十六进制符号
XID　交换标识（ISO 8802.2）

第 1 章　工控领域和楼控领域的控制网络技术

工控领域中的控制网络叫做工业控制（以下简称“工控”）网络，直接面向生产过程和控制，承担着工业生产现场监测物理信息和传输控制信息的特殊任务，并实现各种各样特定目的的工业生产现场监测和控制任务。控制网络通常应满足强实时性与确定性、高可靠性与安全性、工业现场恶劣环境的适应性、总线供电与本质安全等特殊要求。

1.1　工控领域控制网络的发展及主要特点

1.1.1　控制网络技术的发展

1. 什么是控制网络

在工控领域中，大量的现场控制场所中，将许多嵌入微处理器的控制器、控制装置、控制仪表、监测仪表用一个实时性好和可靠性高的可双向传输的全数字化网络连接起来，这样的一个连接网络就是控制网络。控制网络的作用域也叫控制域，控制网络也叫控制域网络，工控领域、楼控领域中的多种现场总线、控制总线都是控制网络，如 LonWorks 总线、C-Bus、EIB（欧洲安装总线）、PROFIBUS（过程现场总线）、FF（基金会总线）、RS-232 总线和 RS-485 总线等都是控制网络。控制网络也常称为控制总线。

控制网络是一种位于生产现场、用于完成自控任务的计算机网络系统。控制网络应用于企业生产现场的网络通信系统的底层，是由多个分散在生产现场、具有数字通信能力的测量控制仪表与控制器作为网络节点构成的。生产现场中的监测控制设备之间、现场设备与监控计算机之间、现场中的传感测量、控制计算机、执行器等功能模块之间的数据传递都是通过控制网络完成的。控制网络是生产现场中各控制设备、传感器和执行器之间沟通数据信息的通道。控制网络系统可以很好地完成监测和控制的任务。

控制系统中，是将若干个监控点构成一个监控范围，采用同一种控制网络技术形成一个控制域。如果在一个系统中，采用了多种不同的控制网络技术就会形成多个离散的控制域，使用网关装置将不同的控制网络连接起来，就能将离散的控制域连通起来，将许多离散的控制域集合成一个彼此连通的较大控制域。因此，控制网络选择合适与否对日后的系统扩展工作影响很大。

各类计算机、工作站、打印机、显示终端、各种可编程序控制器（PLC）、开关、电动机、变送器、阀门都可以作为控制网络的节点。在工业生产现场控制网络中，一部分节点是现场控制设备内嵌有 CPU、单片机或其他专用芯片的智能节点，节点本身具有微处理器，可以通过编制控制程序来实现常规控制和智能控制，有的节点只是功能相当简单的非智能设备。

个人计算机（PC）或其他种类的计算机、工作站可以成为控制网络的节点，但控制网络的节点大都是具有计算与通信能力的测量控制设备。具有通信能力的以下一些设备都可以作为控制网络的节点：

1）限位开关、感应开关等各类开关；

2）光电传感器；

3）温度、压力、流量、物位等各种传感器、变送器；

4）可编程序控制器；

5）比例积分微分（PID）等数字控制器；

6）监控计算机、工作站；

7）各种调节阀；

8）电动机控制设备；

9）变频器；

10）直接数字控制器（DDC）等。

控制网络中可以使用中继器来扩展网络，使用网桥、网关来连接不同的局域网。

2. 控制网络由集中式系统向双向全数字总线网络 + 智能节点结构发展

控制网络由集中式控制结构向双向全数字总线网络 + 智能节点结构发展的过程如下：集中式系统是将许多无智能的远程节点（传感器和执行器）连接到一个中央控制器上的系统，如图 1-1 所示。当监控点数较多、系统规模较大时，中央控制器承受的负担太重，整个系统性能迅速下降，使用接入一级中间智能控制器的方法，将中央控制器的部分功能分散化，大幅度降低系统运行时中央控制器的负担，这样的系统如图 1-2 所示。再往后发展，控制网络主要采用了双向全数字数据通信总线，总线上挂接了智能传感器与执行器，网络上的各个节点彼此之间实现了互通信，并可以实现互操作，形成开放性很好的控制网络，如图 1-3 所示。随着控制系统的规模增大和复杂程度提高，以及大区域互联并具有优良的远程监控性能和大区域覆盖控制能力，不同的控制局域网可以通过网际协议（IP）网络来实现互联，形成控制网络的网际网结构，如图 1-4 所示。

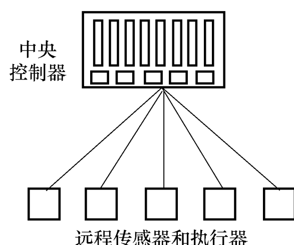


图 1-1　集中式控制结构

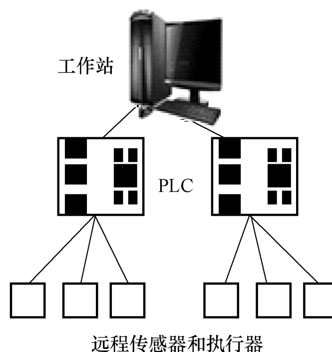


图 1-2　中央控制器部分功能分散到下一级

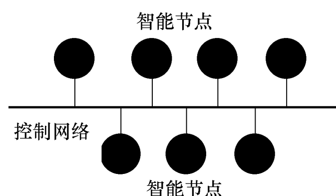


图 1-3　控制网络中挂接智能节点

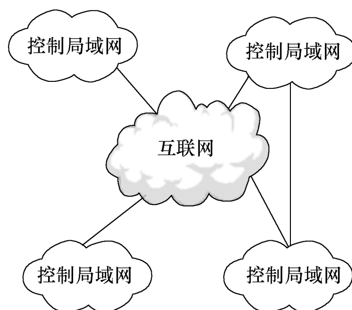


图 1-4　网际网结构

集中式系统并不适于分布式的用途，因为集中式系统的通信能力满足不了许多分布式应用的要求，在这种系统中，对每一个应用都要进行专门通信模块的设计和配置，这就导致出现封闭的专用系统和研发成本高。

3. DCS 和现场总线控制系统

网络控制是通过一个高效能的通信网络将监控节点分布式地组织起来，并实现一定控制目的的控制技术，通过网络控制技术可以实现各种复杂和不同规模系统的控制。

传统的电气设备控制方式是通过一个单一回路对一个设备进行控制。各个不同设备的控制回路之间不能够交换数据或信息，每一个回路都是一个独立的控制域，即使现场有多台设备，则存在多个孤立的控制域；彼此基本上没有关联性。现场分布着许多受控设备和相应的控制系统形成许多离散而不能连通的控制域，使与整个控制系统对应的控制域变得复杂，实现特定功能的监控成本较高。

随着计算机技术、现代通信技术、计算机网络技术、现代控制技术的发展，计算机被引入控制系统，可以对现场传感器采集的任何数据或信息进行特定的处理操作，还可以对控制过程引入目标控制值，通过 PID 控制算法、其他的常规逻辑控制、关联控制、顺序控制、程序控制的算法以及其他高级控制算法，进行较为精细的控制，通过执行机构完成特定的控制功能。这种控制方式属于集中式数字控制。集中式数字控制系统的结构还是较为简单，并直接面向控制对象，但没有一个通信网络架构将整个控制的核心单元纳入到一个高效能的网络体系中。

尽管将计算机引入控制系统使得一些高级控制算法得以实现，但是随着生产过程控制的复杂化、被控对象的数量增加，需要进行集中控制的物理回路数量大幅增加，整个控制系统的实时性、可靠性得不到保证。同时，系统的复杂性导致系统的支持软件系统相应变得复杂化，升级工作难度也大为提高。

后来出现了第二代计算机控制系统——DCS（集散控制系统），DCS 的特点是“集中管理，分散控制”。DCS 中，现场设备之间相互通信必须经过主机，这样一来整个系统的效率就会降低，如果主机发生故障，整个系统无法继续工作；DCS 中，许多现场仪表仍然使用传统的 4～20mA 电流模拟信号，数字化处理难度大；DCS 的开放性并不好。集中式控制结构就是 DCS。

现场总线（是用于生产现场的设备或现场仪表互联的数据通信网络，是一种全数字化、双向全分散、可实现现场设备和仪表互通信、互操作、开放式的通信网络。现场总线控制系统（FCS）将控制功能继续向现场底层方向迁移，克服了 DCS 中的中央管理工作站（主机）负担过重和现场仪表及控制器之间无法实现互通信的缺点，大大提高了控制系统的效能。

现有的不同现场总线标准种类较多，各自独立并不兼容，且各有自己的优势和适用范围，用户选用哪种现场总线技术本身有一定的难度。在实际的工业应用中，大量地存在这样一种情况：控制系统中有多种现场总线同时存在，如果要求将工控系统和管理域的数据信息网络进行无缝集成，实现管理控制一体化，对应地会使系统功能组态复杂化。还有现场总线技术在本质安全方面和数据传输速率方面都存在明显不足。

随着以太网技术的深入发展以及将以太网技术引入工控领域，其技术优势非常明显，以至于业界将现场总线视为传统的控制网络，而将以太网中的工业以太网和实时以太网作为现代控制网络。

1.1.2　控制网络的主要特点

1. 控制网络通信的实时性与可靠性

控制网络（工业控制网络）中，数据传输的实时性与被控系统响应具有很好的实时性和可靠性是其基本属性，也是对通过控制网络组织的控制系统最基本的要求。

控制网络能够很好地支持实时数据信息的通信。实时性是指在网络通信过程中，能够实时采集过程参数，实时对采集到的数据信息进行计算及相关处理，并迅速反馈给系统而完成过程控制，满足过程控制对控制系统的响应时间的要求，响应具有完全的确定性。控制网络在处理定时

事件和随机事件时，可以按照指定的策略依顺序进行实时处理。

一般来讲，控制网络通信过程中的数据信息量不是很大，多为简短的小数据量的测控指令，因此控制网络的数据传输速率一般不是很高，如传输速率一般不高于 1Mbit/s，但实时响应时间要求较高，为 0.01～0.5s。控制网络当然应具备一定的鲁棒性。

2. 采用同一通信协议时不同网络产品具有很好的兼容性

控制网络种类较多，主要的区别是彼此之间采用不同的通信协议和标准，一般情况下，只要采用了相同的通信协议或标准，不同厂商生产的相同的网络核心产品及组件能够互换互用、互连互通，控制网络构建的控制系统具有很好的开放性。换言之，既能够实现互通信，并在互通信的基础上实现互操作。因此，各制造商的产品要通过相应的一致性测试及互操作性测试，并通过专门的测试认证。

3. 网络通信具有极高的可靠性

控制网络必须连续运行，如果出现中断和故障都会导致控制系统的瘫痪，直接造成重大的生产损失及设备和人员损失，甚至出现安全事故。所以控制网络的通信过程及网络本身必须具有极高的可靠性，如要求过程数据信息和操作指令数据信息实现零丢包率。

通信的高可靠性表现在以下 3 个方面：

1）网络设备质量优良。网络自身不易发生故障，平均故障间隔时间长，网络本身具备优良和有效的差错控制技术。

2）容错能力强。网络系统局部单元出现故障时，不会导致整个控制系统的不正常工作。

3）可维护性好。故障发生后，能及时发现和及时处理，通过维修使网络及时恢复。网络本身具有很强的自诊断能力，且能迅速排除故障。

4. 优良的适应恶劣环境的能力

控制网络能够在恶劣的生产现场环境下，保证数据通信有很高的可靠性。恶劣的生产现场环境包括：环境温度与湿度变化范围大和变化剧烈；空气质量很差，空间中粉尘污染严重；振动干扰源多且强度大；电磁干扰严重等。控制网络设备必须能够耐振动、适合在大温差环境下工作；耐腐蚀、防尘、防水能力强；电磁环境适应性强以及电磁兼容性好等。因此，控制网络设备需要经过严格的设计和测试。

5. 具备很高的网络安全性

控制网络构建的控制系统负责重要的生产过程和设备的控制及管理，网络系统的安全也至关重要，抵御恶意的非法入侵、保证监控信息安全的特定流向，都是网络应具备的基本属性。

1.2　控制网络和信息网络的主要区别及常用的控制网络

1. 控制网络和信息网络的主要区别

信息网络的作用域是一般意义的信息域，因此信息网络也叫信息域网络。对信息网络在以下方面不做较为苛刻的要求：既不要求网络具有强实时性和数据信息必须具有不能丢失的高可靠性和非常高的安全性，也不要求网络常年工作在恶劣的现场环境条件中。

（1）网络传输的数据信息量大小不同

控制网络传输的信息多为短帧信息，数据信息量小，且信息交换频繁；而信息网络传输及处理的数据信息量一般较大，传输和处理多媒体文件、视音频文件是信息网络的工作常态，信息网络中信息交换也远比不上控制网络频繁。

（2）数据信息流向有各自不同的规律

控制网络域中各种节点设备和现场传感器、变送器之间的数据信息流向是确定的，即从传感

器流向节点设备；而嵌入了微处理器的节点设备与现场的执行器之间的数据信息流向一般是从节点设备流向执行器，如图 1-5 所示。而信息网络中，网络节点设备与网络之间的数据信息流向是双向的，如图 1-6 所示。

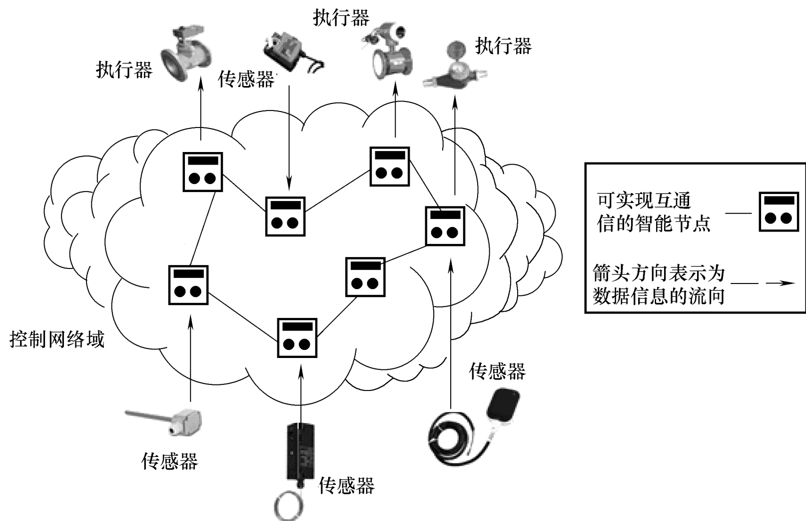


图 1-5　控制网络域中数据信息的流向

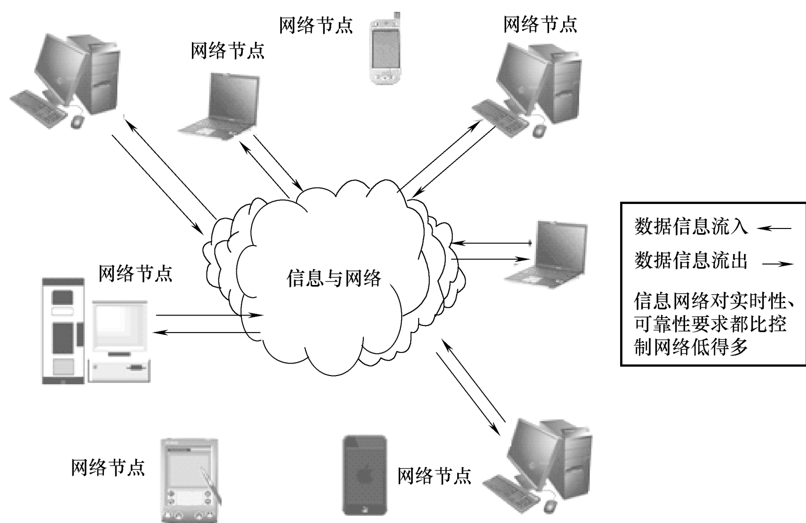


图 1-6　信息网络数据信息流向

（3）周期性信息与非周期性信息的所占比例差别大

在控制网络处理的信息中，周期性与非周期性信息同时存在，正常状况下，周期性信息（如周期性监控信息、过程监控信息）较多，而非周期性信息（如突发性事件信息、对环境变化的反应性信息等）较少；而信息网络非周期性信息所占比例很大。

（4）对事件的响应时间差距较大

过程控制网络的响应时间要求为 0.01～0.5s，制造自动化网络的响应时间要求为 0.5～1.0s；信息网络的响应时间要求为 2.2～6.0s，对接收数据信息后的响应时间要求较为宽松，因此信息网络对许多响应的实时性可以忽略。

（5）数据信息传送的顺序性

控制网络中测控信息的传送有一定的顺序性，如传感器采集到的信息，首先传送到控制器或

网络节点设备，由控制器或网络节点设备进行运算处理，再将控制信息传送给执行机构，驱动执行器完成特定的控制动作；信息网络的信息传送，一般情况下，没有上述的顺序性限制。

（6）对恶劣环境的适应性

控制网络能够很好地适应恶劣的生产现场环境，而信息网络对环境适应性的要求不高。

（7）本质安全防爆性能

控制网络运行在具有可燃与易爆气体的环境中，应具有自动防止故障发生或者安全停止运行的能力，即本质安全防爆性能，而信息网络对本质安全防爆性能没有要求。

（8）开放与兼容性

控制网络在使用不同厂商生产的产品与系统时，要解决通信协议的一致性来实现产品和核心组件的兼容，保证系统具有一定的开放性。信息网络主要需要解决互联互通问题，实现异构信息网络数据信息的异构网间传递。

2. 常用的控制网络

在工控领域中，常用的控制网络技术有多种：传统的控制总线，如 RS-232、RS-485 总线；在工业生产领域中，大量使用现场总线；近年来，越来越广泛地应用工业以太网技术和实时以太网技术等。国际上，现场总线的种类多达 40 多种，而常用的工业现场总线也接近 10 种。

1.3 传统的控制总线

1.3.1 RS-232 总线

1. RS-232C 总线部分特性

RS-232C 总线是一种异步串行通信总线，总线标准是美国电子工业协会（EIA）正式公布的 RC-232C，RS（Recommended standard）代表推荐标准，232 是标识号，C 代表 RS232 的第三次修改。

部分特性：

1）传输距离一般小于 15m，传输速率一般小于 20kbit/s。

2）完整的 RS-232C 总线接口有 22 根线，采用标准的 25 芯 DB 插头座。

3）RS-232C 总线采用负逻辑。

4）采用 RS-232C 总线连接系统。

近程通信：10 根线，或 6 根线，或 3 根线。

2. RS-232C 总线常用连接形式

（1）5 根线连接方式（见图 1-7）。

（2）3 根线连接方式（见图 1-8）。

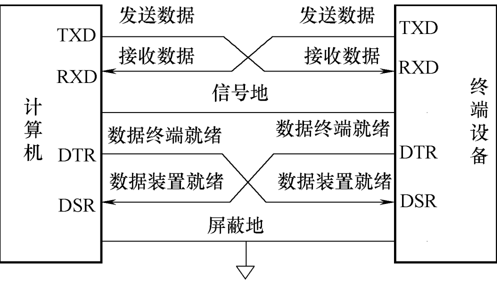


图 1-7 计算机与终端设备的 RS-232C 5 根线连接方式

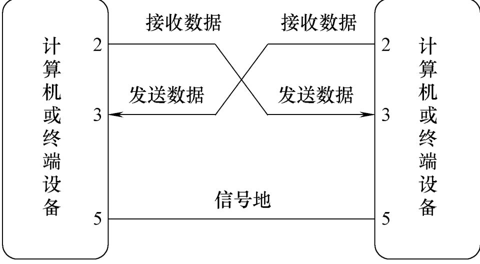


图 1-8 3 根线连接方式

RS-232C 总线插头在数据通信设备（Data Communication Equipment，DCE）端，插座在数据终端设备（Data Terminal Equipment，DTE）端。一些设备与 PC 连接的 RS-232C 总线接口，因为不使用对方的传送控制信号，只需 3 条接口线，即“发送数据”、“接收数据”和“信号地”。所以采用 DB-9 的 9 芯插头座，传输线采用屏蔽双绞线。

9 针串行口插头如图 1-9 所示。

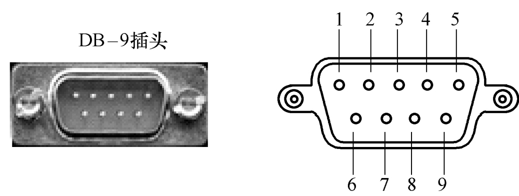


图 1-9　9 针串行口插头

9 针串行口插头针脚定义：

Pin1　CD　Received Line Signal Detector（Data Carrier Detect）
Pin2　RXD　Received Data
Pin3　TXD　Transmit Data
Pin4　DTR　Data Terminal Ready
Pin5　GND　Signal Ground
Pin6　DSR　Data Set Ready
Pin7　RTS　Request To Send
Pin8　CTS　Clear To Send
Pin9　RI　Ring Indicator

对应的中文含义见表 1-1。

表 1-1　9 针串口针脚定义（公口）

针　脚	信号来自	缩　写	描　述
1	调制解调器	CD	载波检测
2	调制解调器	RXD	接收数据
3	PC	TXD	发送数据
4	PC	DTR	数据终端准备好
5	GND	GND	信号地
6	调制解调器	DSR	通信设备准备好
7	PC	RTS	请求发送
8	调制解调器	CTS	允许发送
9	调制解调器	RI	振铃指示器

一般只用 2、3、5 号 3 根线，3 根线的接线端子情况如下：

2 RXD 输入
3 TXD 输出
5 GND 接地

1.3.2 RS-485 总线

1. RS-485 总线的部分特性

在要求通信距离为几十米到上千米时，广泛采用 RS-485 串行总线标准。RS-485 总线采用平衡发送和差分接收，因此具有抑制共模干扰的能力。加上总线收发器具有高灵敏度，能检测低至 200mV 的电压，故传输信号能在上千米以外得到恢复。RS-485 总线采用半双工工作方式，任何时候只能有一点处于发送状态，因此发送电路需由使能信号加以控制。RS-485 总线用于多点互联时非常方便，可以省掉许多信号线。应用 RS-485 总线可以联网构成分布式系统，其允许最多并联 32 台驱动器和 32 台接收器。

2. RS-485 总线的主要技术参数

RS-485 总线的主要技术参数如下：

1）RS-485 总线的电气特性：逻辑“1”以两线间的电压差为 +(2～6)V 表示；逻辑“0”以两线间的电压差为 -(2～6)V 表示；

2）RS-485 总线的数据最高传输速率为 10Mbit/s；

3）RS-485 总线接口是采用平衡驱动器和差分接收器的组合，抗共模干扰能力增强，即抗噪声干扰性好；

4）RS-485 总线接口的最大传输距离约为 1219m。另外 RS-232 总线接口在总线上只允许连接 1 个收发器，即只有单站点能力，而 RS-485 总线接口在总线上允许连接多达 128 个收发器，即具有多站点能力，这样用户可以利用单一的 RS-485 总线接口方便地建立起设备网络。

3. RS-485 总线的连接和拓扑结构

RS485 总线接口组成的半双工网络，一般只需 2 根连线（AB 线），RS-485 总线接口均采用屏蔽双绞线传输。

RS-485 总线连接示意如图 1-10 所示。

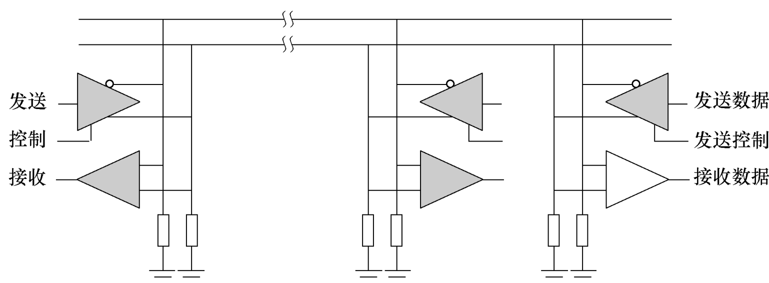


图 1-10　RS-485 总线连接

RS-485 总线网络拓扑结构和半双工总线结构如图 1-11 所示。

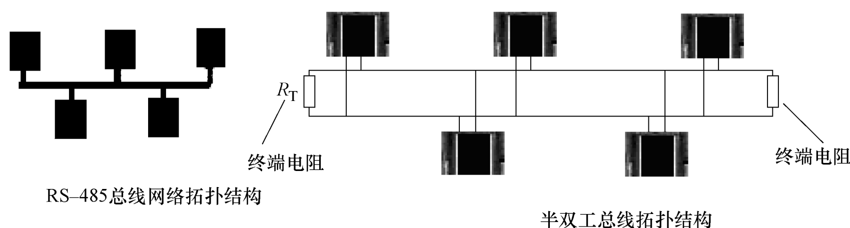


图 1-11　RS-485 总线网络拓扑结构和半双工总线拓扑结构

1.4　现场总线

1.4.1　什么是现场总线及主要种类

1. 现场总线的定义

现场总线是安装在生产现场，对许多现场物理量进行监测控制的现场设备、仪表与控制室内的自动控制装置、系统之间实现连接的一种串行、数字式、双向及多点通信的数据通信总线。或者说，现场总线是应用在生产现场，将许多智能现场设备和自动化监测仪表和数字控制系统进行连接，实现这些设备、检测仪表及控制系统的全数字化、多分支结构互联互通的数据通信网络系统。网络中分散、数字化、智能化的测量和控制设备作为网络节点，用总线相连接，实现相互交换信息，共同完成自动控制功能。

2. 现场总线的种类及常用的现场总线

当前国际上总共约有 40 多种现场总线，如 INTERBUS、DeviceNet（设备网）、ModBus、ARCnet、CAN（控制器局域网）、P-Net、EIB 等，分布应用在工业的各个不同行业和应用领域，其中一部分现场总线在楼宇自控（BAC）技术领域中也有广泛和深入的应用。

现场总线和传感器总线、设备总线在传输的数据量方面有很大差别，传感器总线属于位传输，设备总线主要按字节传输。而现场总线传输的数据流，可以是短小的测控指令，也可以是周期性和非周期性的测控指令，还可以是数据量较大的面向连接和非面向连接的数据文件。

不同行业和应用领域适合使用哪一种现场总线，需根据具体情况来决定。但在 40 多种现有的现场总线当中，由于具有不同的技术特点，所以还没有哪一种能够覆盖所有的应用面，每一种现场总线都有自己特有的应用领域和应用范围。

主要现场总线的应用领域如图 1-12 所示。

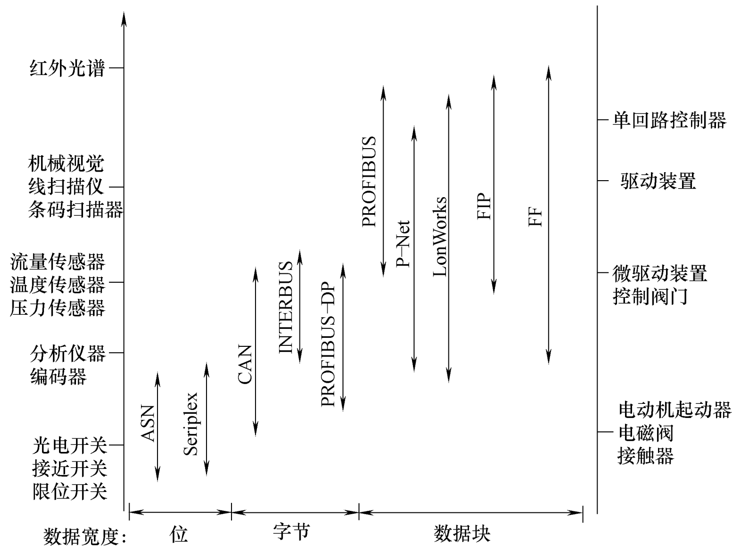


图 1-12　主要现场总线的应用领域

主要的现场总线在部分行业中的应用情况如下：

1）过程控制：FF、PROFIBUS、HART（可寻址远程传感器的数据公路）、WorldFIP（世界工厂仪表协议）；

2）制造业自动化：PROFIBUS、INTERBUS；

3）农业、养殖业、食品加工业：P-Net；

4）楼宇自动化：LonWorks、PROFIBUS、ModBus、CAN。

经过十几年的竞争发展，IEC（国际电工委员会）的现场总线标准化组织制定了 IEC 61158 现场总线标准，包含以下 8 种现场总线：PROFIBUS 、HART、ControlNet 、DeviceNet、CAN 、AS-I 总线、FF、ModBus。

第 4 版的 IEC 61158 国际标准将 20 种类型现场总线收录进标准规范体系中，具体包含总线类型见表 1-2。

表 1-2　第 4 版 IEC 61158 国际标准包括的 20 种类型现场总线

类型	技 术 名 称	类型	技 术 名 称
Type1	TS61158 现场总线	Type11	TCnet 实时以太网
Type2	CIP 现场总线	Type12	EtherCAT 实时以太网
Type3	PROFIBUS 现场总线	Type13	以太网 Powerlink 实时以太网
Type4	P-Net 现场总线	Type14	EPA 实时以太网
Type5	FF-HSE 高速以太网	Type15	ModBus-RTPS 实时以太网
Type6	SwiftNet（被撤销）	Type16	SERCOSI、II 现场总线
Type7	WorldFIP 现场总线	Type17	VNET/IP 实时以太网
Type8	INTERBUS 现场总线	Type18	CC-Link 现场总线
Type9	FF H1 现场总线	Type19	SERCOS III 实时以太网
Type10	PROFINet 实时以太网	Type20	HART 现场总线

国际电工委员会（IEC）/SC65C 制定了 IEC 61784 系列的配套标准，标准组成如下：

1）IEC 61784-1：工业通信网络、配置文件、第 1 部分：现场总线配置文件。

2）IEC 61784-2：工业通信网络、配置文件、第 2 部分：基于 ISO/ IEC 8802. 3 标准的实时网络用附加数据总线配置文件。

3）IEC 61784-3：工业通信网络、配置文件、第 3 部分：工业网络中功能安全通信行规。

4）IEC 61784-4：工业通信网络、配置文件、第 4 部分：工业网络中信息安全通信行规。

5）IEC 61784-5：工业通信网络、配置文件、第 5 部分：工业控制系统中通信网络安装行规。

IEC 61784-1 规定了现场总线通信行规；IEC 61784-2 提供了实时以太网的通信行规。通信行规给出了接入现场总线的设备进行互通信、互操作的特征及选项说明。IEC 61784-2 通信行规具体规范了实时以太网中进行数据通信时的传递时间、网络中节点数、网络所使用的拓扑结构、中断节点交换机的数量、实时以太网的流通量、带宽、时间同步准确度和冗余恢复时间等。

在原来 8 种类型现场总线的基础上不断完善扩充，于 2001 年 8 月制定出由 10 种类型现场总线组成的第 3 版现场总线标准，它们是：Type1 TS61158 现场总线、Type2 ControlNet 和 Ethernet/IP 现场总线、Type3 PROFIBUS 现场总线、Type4 P-Net 现场总线、Type5 FF HSE 现场总线、Type6 SwiftNet 现场总线、Type7 WorldFIP 现场总线、Type8 INTERBUS 现场总线、Type9 FF H1 现场总线以及 Type10 PROFINET 现场总线，该标准于 2003 年 4 月成为正式国际标准。

FF H1、ControlNet、PROFIBUS、INTERBUS、P-Net、WorldFIP、SwiftNet 和 FF 的高速以太网（HSE）规范，由于这些现场总线所使用的通信协议各不相同，彼此之间属于异构网络，一般情况下无法实现互通信和互操作，各自不同的应用系统在应用于相同监控目的时，也无法实现互换互用、互连互通。

在工控领域中，同一个控制系统的通信网络架构可以包含两种或两种以上的现场总线，每一

种现场总线架构的系统部分构成了一个控制域、连通域，不同现场总线架构的系统部分构成不同的控制域，这些不同控制域是不连通的，如果要使不同的控制域实现连通，就要使用网关将不同的现场总线实现互连。

现场总线技术还在低速现场总线领域和高速现场总线领域继续深入发展。低速现场总线及应用系统，应用于数据传输速率较低领域，因此实现传输速率要求较低的控制，如过程控制等。高速现场总线技术组成的控制系统如果和 Internet 互联实现远程监控，组成的综合网络环境的瓶颈速率可大幅度提高。这里的瓶颈速率是指两个异构网络互联，网络的通信瓶颈速率仅仅为两个异构网络中速率较低的那个网络的数据传输速率。

IEC 61158 现场总线标准已经发展了一系列的标准，最新版本为 IEC 61158-6-20（2007 年发布），总共有 20 种现场总线加入该标准。近年来，随着工业以太网、实时以太网作为现代控制网络技术的发展，IEC 61158 现场总线标准的 8 种现场总线都在各自修改通信协议的高层即应用层协议，支持 IEC 61784 规范（行规族及行规），目的是通过高层协议的修改增加这些现场总线彼此之间的兼容性，完善 IEC 61158 标准。

由于本书的主要内容是“BACnet 标准与楼宇自控技术”，所以下面仅仅概要性地介绍在楼宇自控系统中有较深入应用的部分现场总线技术。

1.4.2　PROFIBUS

1. PROFIBUS 的结构

PROFIBUS 是过程现场总线（Process Field Bus）的缩写，主要用于制造自动化、过程自动化，以及交通、楼宇控制及电力等领域的自动化，实现现场级的分散控制和车间级或工厂级的集中监控。

PROFIBUS 是当今较为流行的现场总线技术之一，1989 年批准为德国标准 DIN19245。经应用完善后，于 1996 年 6 月批准为欧洲现场总线标准 EN50170 V.2。根据 IEC 达成的关于现场总线国际标准的妥协方案，PROFIBUS 标准于 1999 年已成为国际现场总线标准 IEC 61158 的一个组成部分，2001 年被批准成为我国工业自动化领域行业标准中惟一的现场总线标准。

PROFIBUS 技术目前在离散制造业和过程自动化领域占据主导地位，在楼宇自控技术领域也有较多的应用。

PROFIBUS 由 PA、DP 和 FMS 3 个部分组成：PA 主要应用于过程自动化，适合于本征安全的场合；DP 的特点在于它的高速、廉价，专为现场级分散 IO 节点设计；FMS 主要为车间级通信任务提供大量的通信服务。PROFIBUS 系统的 PA、DP 和 FMS 3 个部分彼此兼容。PROFIBUS-DP（Decentralized Periphery，分散型外围设备）系专门为过程控制系统与分散的外围设备之间高速数据信息交换而设计的。其传输介质为双绞线或光纤连接的 RS-485 传输制式，波特率为 9.6～12Mbit/s，系统构成成本低，高速可靠；PROFIBUS-PA（Process Automation，过程自动化）专为过程自动化设计，可使传感器和执行机构连在一根总线上，并有本征安全规范；PROFIBUS-FMS（Fieldbus Message Specification，现场总线信息规范）用于车间级监控网络，是一个令牌结构、实时多主网络。

PROFIBUS 系统结构如图 1-13 所示。

PROFIBUS 总线可承担现场、控制、监控三级通信。PROFIBUS 现场总线网络有 FMS、DP、PA 3 种协议方式，一个很大的优势在于这 3 种 PROFIBUS 系列网络可以进行灵活的配置，可根据不同的应用对象灵活地选取不同的总线。PROFIBUS-DP 是一种高速低成本通信网络，用于设备级控制系统与分散式 I/O 的通信，使用 PROFIBUS-DP 可取代 DC 24V 或 4～20mA 信号传输。

为高速传输用户数据而优化的 FROFIBUS-DP 总线，适合用于 PLC 与现场分散外设间的通

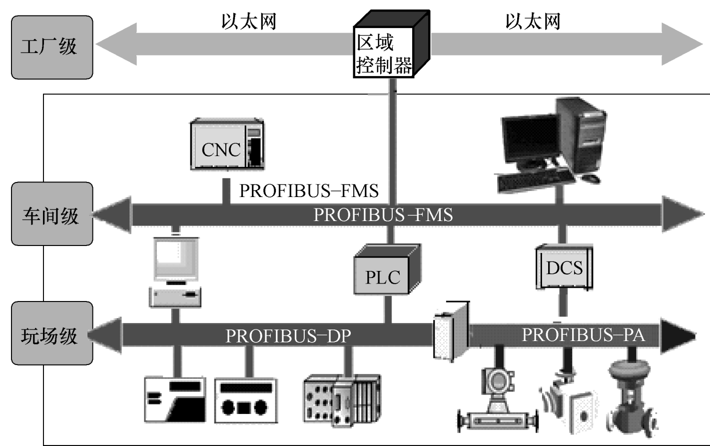


图 1-13　PROFIBUS 系统结构

信，可被实时性和可靠性要求高的楼宇自控系统采用。在有些场合，采用工业级的 PLC 作为控制器代替使用广泛的 DDC，可以减少系统的从站而提高系统的可靠性。

2. PROFIBUS 通信参考模型

PROFIBUS 通信参考模型如图 1-14 所示。

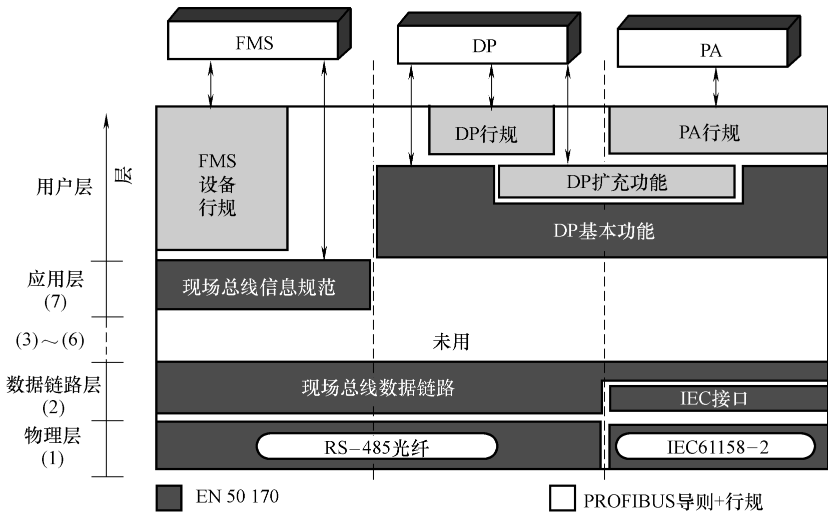


图 1-14　PROFIBUS 通信参考模型

3. 总线存取技术

PROFIBUS 的 3 种通信协议类型（DP、PA、FMS）均使用一致的总线存取控制机制，并通过数据链路层（第 2 层）来实现。PROFIBUS 采用混合的总线存取控制机制来控制数据传输。在主站之间采用令牌传送方式，主站与从站之间采用主从方式。

（1）令牌传送方式

一个 PROFIBUS 系统由 3 个主站和 7 个从站组成，如图 1-15 所示。3 个主站之间确定了一个逻辑令牌环，在令牌环中，主站按照地址的升序一个接一个地进行逻辑排列，特殊的令牌帧在各主站之间顺序传递，以此赋予各主站与从站间通信的权利。在总线初始化和启动阶段，通过辨认主站来建立令牌环，主站的令牌保持时间长短取决于逻辑环路内令牌的循环时间。

在 PROFIBUS 的令牌环通信机制中，主站按照地址的顺序构成一个循环顺序，形成了一个封闭逻辑令牌环，所以最高地址的主站后接着的是最低地址的主站。本地主站（TS）负责管理令

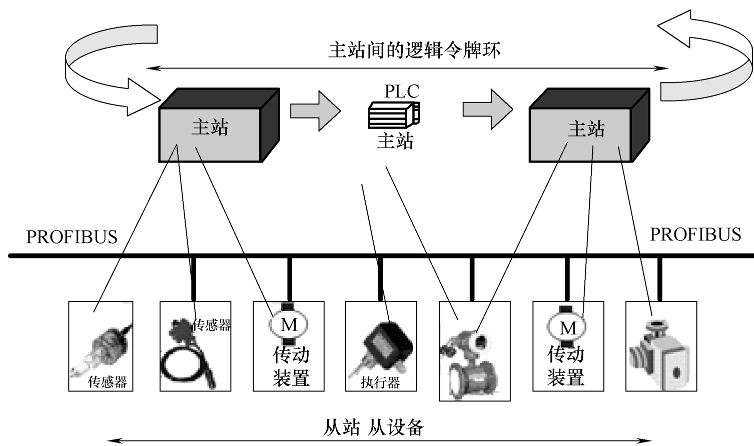


图 1-15　主站和从站从设备进行通信的原理

牌，TS 从先行站（PS）获得令牌处理完数据后，再传递给后继站（NS）。

主站间通信采用令牌环控制的媒体访问控制（MAC）方式，所有的主站构成一个逻辑令牌环，确保在任何时刻只有一个主站点发送数据。拥有令牌的主站可与从站通信，向从站发送或索取信息。

（2）主从机制

图 1-15 所示系统中的主站分别通过 PROFIBUS 总线与其相连的从站构成主从系统。获得令牌并拥有通信权的当前主站有权发送信息、存取指定给它的从站设备。这些从站是被动节点，主站可以发送信息给从站或从从站获取信息。

1.4.3　LonWorks 总线技术

1. LonWorks 技术的主要组成

在工控领域和楼控领域，LonWorks 总线技术有着广泛而深入的应用，LonWorks 是 Local Operating Network（局部操作网络）的缩写，LonWorks 是由美国 Echelon 公司于 1991 年推出的一种性能优良的测控网络，使用 LonWorks 技术架构的控制网络，其网络协议是完全开放的，可以同时支持多种不同的通信介质，网络拓扑结构灵活。LonWorks 技术非常适合部分工控项目和楼宇自控系统中的信号采集和数据传送。

LonWorks 技术主要由以下 7 个部分组成，即

1）智能神经元芯片；

2）LonTalk 协议；

3）LonMark 互操作性标准；

4）LonWorks 收发器；

5）LonWorks 网络服务架构；

6）Neuron C 语言；

7）LonBuilder 网络开发工具和 NodeBuilder 节点开发工具。

LonWorks 网络的基本单元是节点。一个网络节点包括神经元芯片、电源、一个收发器和有监控设备接口的 I/O 电路。

2. Lonworks 技术中重要的技术单元

（1）LonWorks 应用系统的组成

LonWorks 总线网络是控制域网络，可将数据检测、数据处理、系统监控功能统一起来。Lon-

Works 总线网络由控制计算机、现场智能节点、网络适配器和通信介质等组成，LonWorks 总线是生产现场具有数字通信能力的测控仪表与控制计算机之间的串行数字通信链路。

LonWorks 总线网络中的智能节点通过通信介质与周边的外部设备进行通信并实现监控。当控制网络中存在几种不同的通信介质时，可以通过路由器互联。LonWorks 控制网络可以通过网关与其他异构网络相连而构成覆盖区域更大的控制网络。LonWorks 总线网络可以构造实现在控制层提供互操作的测控系统，控制的实时性好。

LonWorks 应用系统中包括 LonWorks 节点、路由器、LonWorks 收发器、网络接口产品模块以及开发平台。其中，神经元芯片是 LonWorks 节点的核心，它与收发器一起构成了网络智能节点；网络接口产品模块可以使非神经元芯片的节点与 LonWorks 总线网络通信；开发工具平台包括 LonBuilder 和 NodeBuilder，提供了网络开发的基本工具和网络协议分析工具。

（2）LonWords 技术使用的通信协议

LonWorks 技术使用了 LonTalk 通信协议。LonTalk 通信协议是一个开放的协议，采用了 ISO/OSI 的 7 层参考模型，由于使用了 LonTalk 通信协议，LonWorks 总线网络通信具有以下鲜明的优点：通信过程的交换数据包不大，响应及时、安全、可靠、用对等的方式通信，即通信的实时性好、可靠性高。

LonWorks 通信协议被固化在叫做 Neuron（神经元）芯片中，这个芯片是 LonWorks 智能设备中的核心器件。

（3）LonWorks 技术核心器件——神经元芯片

Neuron（神经元）芯片是一个超大规模集成电路器件，分为 MC143150 和 MC143120 两个型号系列，是 LonWorks 网络技术的核心器件，它实现网络功能，并执行节点中的特定应用程序。一个典型的节点包含 Neuron 芯片、电源、收发器和 I/O 电路（输入/输出通道），如图 1-16 所示。

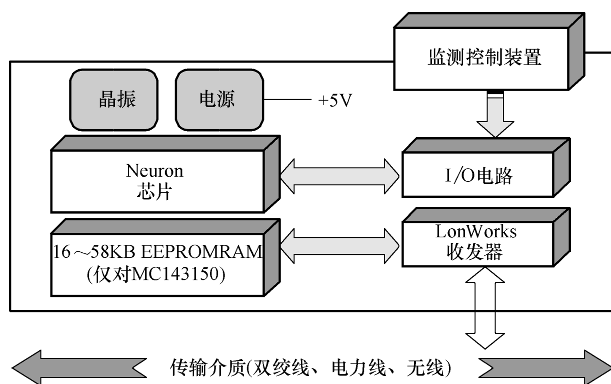


图 1-16　一个典型的 LonWorks 网络节点

Neuron 芯片内含 3 个 8 位 CPU，分别为网络 CPU、媒体访问 CPU 和应用 CPU，带有网络通信端口，可提供单端、差分、专用模式，可选的传输速率为 0.6kbit/s ~ 1.25Mbit/s。

Neuron 芯片内的 3 个微处理器在系统固件中各有独特的功能。媒体访问控制（MAC）CPU 主要控制七层网络协议中的 1、2 层，它负责驱动通信子系统的硬件，并执行避免冲突的算法。媒体访问控制处理器和网络处理器通过共享存储器中的网络缓冲区进行网络信息的收发工作。

网络（Net）CPU 主要控制网络协议中的 3 ~ 6 层，它处理网络变量进程、寻址、鉴别认证、软件定时器、网络管理和路由等功能。网络处理器使用共享存储器中的网络缓冲区同媒体访问控制处理器互传信息，使用共享存储器中的应用缓冲区同应用处理器互传信息。在更新共享缓冲区

的数据时，用硬件信号来仲裁对共享缓冲区数据访问的冲突。

应用（APP）CPU 主要执行用户代码和为用户代码调用的操作系统服务。应用程序使用的编程语言是 Neuron C，它派生于 ANSI（美国国家标准学会）C，并为适应集散控制应用作了优化和扩展。Neuron 芯片上所有的程序利用 LonBuilder 网络开发工具或 NodeBuilder 节点开发工具进行软、硬件调试。

（4）LNS 网络操作系统

LNS（LonWorks Network Service，LonWorks 网络服务）网络操作系统是为 LonWoks 控制网络提供监测、管理、安装和设置服务的，通用的，网络化服务的操作系统。它保证了网络工具和应用之间的互操作性，提供了一个支持 LonWorks 网络互操作应用的标准平台，是设计、组态、安装和维护 LonWorks 系统的互操作工具及应用的基础。对应用程序来说，通过 LNS COM 组件的标准接口，访问 LonWorks 网络设备，遵循同一个访问规则，有利于在不同的应用中共享资源。

（5）LonWorks 网络与 Internet 的互联

如果 LonWorks 应用系统要连入 Internet 实现远程监控，可以使用 iLON1000 LonWorks/IP 服务器，并利用隧道（Tunneling）技术通过 IP 网络将用户的监控指令和服务请求通过 Internet 发送至目标节点的传感器、执行器或工作站，实现远程的在线监控。

LonWorks/IP 服务器是一个实现从 LonWorks 网络到 Internet 连接的服务器，它有一个高性能的网络接口，它可以连接 LonWorks 网络到企业 IP 网络或者 Internet。它内置了一个 Web Server，可以基于 Web 方式工作。

（6）可灵活使用网络拓扑结构、多种不同传输介质

LonWorks 的控制网络拓扑结构灵活多变，可以是总线型、星形、环形和混合型，可根据建筑物的结构特点采用不同的网络连接方式。可以最大限度地降低布线系统的复杂性和工作量，提高系统可靠性、可维护性，充分满足楼宇设备自动控制的要求。

可以灵活地使用多种不同的传输介质，如双绞线、光纤、电力线、同轴电缆和无线传输方式等。

（7）LonWorks 总线收发器

LonWorks 应用系统中，根据通信介质的不同，可使用不同的总线收发器，如双绞线收发器、电源线收发器、电力线收发器等。除上述收发器外，LonWorks 技术中还广泛采用无线电收发器、光纤收发器等，以满足不同应用环境的需求。

（8）LonWorks 总线开发工具和网络管理

LonWorks 技术包含了一系列开发工具，可使节点开发和系统联网开发快速有效，主要有 NodeBuilder 节点开发工具和 LonBuilder 网络开发工具、LonManage 网络管理工具和 LNS 技术。

（9）控制程序的编程语言——Neuron C 语言

Neuron C 语言是专门为 Neuron 芯片设计的程序设计语言。它在标准 C 语言的基础上进行了自然扩展，直接支持 Neuron 芯片的固化软件，删除了标准 C 语言中一些不需要的功能（如某些标准的 C 语言函数库），并为分布式 LonWorks 环境提供了特定的对象集合及访问这些对象的内部函数。

Neuron C 语言提供了一些适用于 LonWorks 网络开发的新功能，增加了一个新的对象类——网络变量（Network Variable），网络变量分为输出和输入类型，LON 网络上各节点之间可通过网络变量互传信息，且网络变量的传送工作由固件自动完成，开发人员只需在 Neuron C 应用程序中给网络变量赋值即可；此外，还增加了一个新的语句类型—when 语句，引入事件（Events）驱动机制，整个应用程序用 when 语句引导；通过对 I/O 对象（Object）的声明，使 Neuron 芯片的多功能 I/O 得以标准化，便于对多种类型的信号进行监控。

1.4.4　ModBus

1. ModBus 技术及控制系统的技术特征

ModBus 是一种通用的现场总线，除了在工控领域中有很广泛的应用以外，在楼宇自控系统中也有较多的应用。工业自动控制系统和楼宇自动控制系统在控制网络化过程中，利用现场总线技术，将符合同一标准的各种智能设备统一起来，彻底实现整个监测系统的分散控制，将提高系统集成度和数据传输效率、延长有效控制距离，并有利于提高系统抗干扰性能和扩展系统功能。ModBus 作为一种通用的现场总线，很多厂商的工业控制器、PLC、智能 I/O 与 A-D 转换模块具备 ModBus 通信接口。

ModBus 是自 1979 年以来的工业通信标准，其应用层非常简单，且被广为接受。它是控制系统跟现场仪表或设备进行通信的一个很好的选择。

ModBus 控制系统的技术特征：

1）ModBus 通信协议是一种工业现场总线通信协议，ModBus 协议把通信对象定义为“主站”（Master）和“从站”（Slave）。ModBus 总线网络中的各个智能设备通过异步串行总线连接起来，系统中只能有一个控制器是主站，其余智能设备作为从站。主站发出请求，从站应答请求，并送回数据或状态信息。

2）ModBus 系统开发成本低，简单易用，通过 ModBus，可以很方便地将不同厂商生产的控制设备连接控制网络，进行集中监控。

2. ModBus 网络体系结构

ModBus 网络体系结构的一个实例如图 1-17 所示。

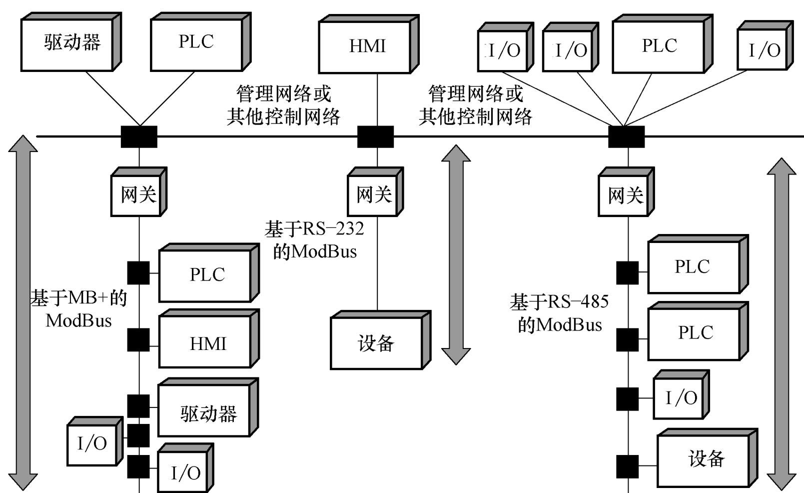


图 1-17　ModBus 网络体系结构的一个实例

图 1-17 中的 HMI（Human Machine Interface，人机界面）是 ModBus 技术中的人机界面或称为用户界面。HMI 的接口种类很多，有 RS-232、RS-485、RJ-45 网线接口等。

在不同的现场总线应用系统中，现场总线是控制网络，控制网络还要与处于信息域中的管理网络互联组成完整的监控系统，一般通过网关来实现这种连接，如图 1-18 所示，在 ModBus 网络体系中就是这种结构。

3. ModBus 协议和 ISO/OSI 参考模型

ModBus 协议和 ISO/OSI 参考模型的关系如图 1-19 所示。

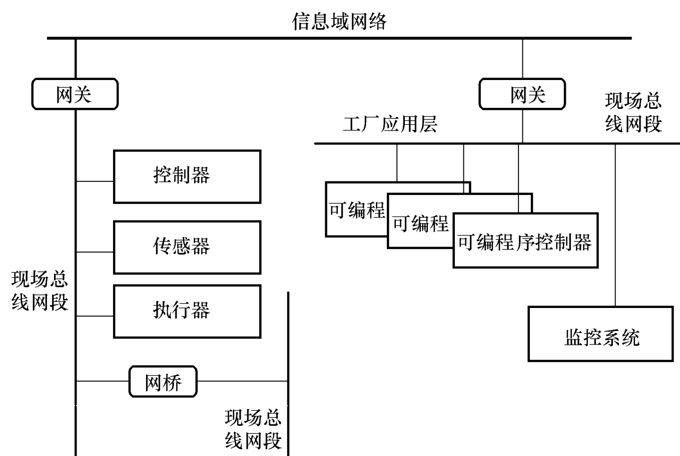


图 1-18　用网关来实现现场总线和管理网络的互联

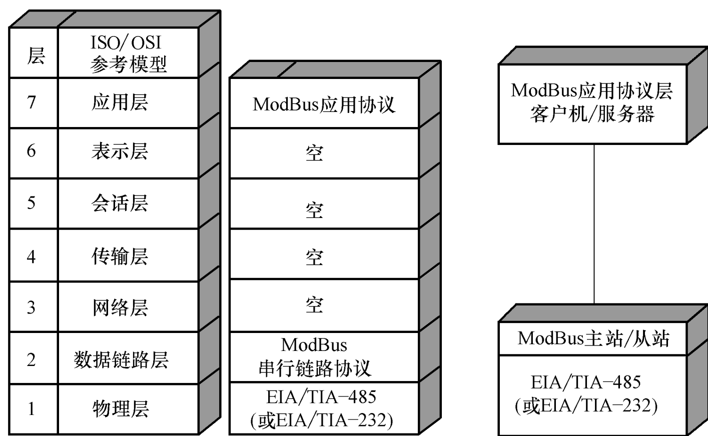


图 1-19　ModBus 协议和 ISO/OSI 参考模型的关系

1.4.5　CAN 总线网络

1. CAN 通信技术的特点

CAN（Controller Area Network，控制局域网）总线网络技术是由德国 Bosch 公司为汽车的监测和控制而开发设计的一种串行数据通信总线技术，CAN 总线网络有很高的可靠性，适用于低成本、高性能的现场控制设备及其互联，可构成智能化系统的实时过程监测控制与管理系统。由于 CAN 总线具有优越的性能和较广的应用范围，现已成为 ISO 11898 标准，并成为工业数据通信的主流技术之一。

CAN 作为数字串行通信技术，在可靠性、实时性和灵活性方面具有较强的技术优势。CAN 通信技术的主要特点如下：

1）挂接在 CAN 总线网络上的节点不分主从，网络上任一节点均可在任意时刻主动地向网络上其他节点发起一个通信进程，通信方式灵活。

2）CAN 总线网络上的节点信息可划分为不同的优先级，使用优先级来控制网络节点间传输数据的紧迫程度和不同的实时性要求。高优先级的数据传输等待不会超过 134μs。

3）CAN 总线采用总线仲裁技术，当出现多个节点同时向总线发送信息时，优先级高的节点可以继续，优先级较低的节点会主动退出发送。

4）网络节点间的通信速率在 5kbit/s 以下时，CAN 总线网络的最大直接通信距离为 10km；最高通信速率可达 1Mbit/s，对应的通信距离为 40m。

5）CAN 总线网络上的节点数可多达 110 个。

6）CAN 总线网络采用短帧结构，每一帧的有效字节为 8 个，这样传输时间短，受干扰的概率低，具有极好的检错效果。

7）CAN 总线网络每帧都有循环冗余校验（CRC）及其他检错手段，数据出错率低。

8）CAN 总线网络的通信介质可为双绞线、同轴电缆或光纤，选择灵活。

9）CAN 总线网络应用器件可被设置为休眠方式，相当于同总线断开，降低系统功耗。其休眠状态可借助任何总线激活或者系统的内部条件被唤醒。

10）CAN 节点在系统出现严重错误时可自动关闭输出，使总线上其他节点的操作不受影响。

CAN 总线网络具有以下一些鲜明的优点：

1）CAN 总线网络信息传输采用短帧结构，每一个数据帧的数据量仅为 8B，传输时间短、抗干扰性强。

2）CAN 总线网络数据传送具有较强的差错控制能力，保证数据传送的准确性。

3）CAN 总线网络采用总线仲裁技术，出现多个节点同时向总线发送信息时，优先级高的节点可以继续，而优先级低的节点将停止发送，以此保证重要数据传送的可靠性。

4）CAN 总线网络成本低，许多厂商生产的相关设备都带有 CAN 接口。

随着 CAN 总线在各种领域成功应用和推广，CAN 于 1993 年 11 月成为 ISO 11898 标准。图 1-20 给出了 CAN 总线网络控制方式。

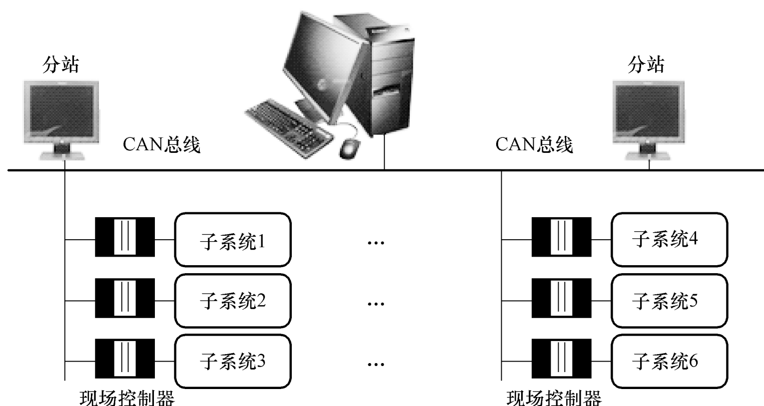


图 1-20　CAN 总线网络控制方式

2. 使用优先级控制结合 CSMA/CA 媒体访问控制模式

CAN 是一种对等式的现场总线，其物理层使用双绞线。在数据链路层上，CAN 总线使用的是一种叫做“带碰撞检测的载波侦听多址访问”（CSMA/CA）的媒体访问控制方式。容许总线上面的任何设备有一定的机会获取总线的控制权来向外发送信息，如果同一时刻有两个以上的设备欲发送信息，就会发生数据碰撞，CAN 总线能够实时地监测这些碰撞情况，并作出相应的位仲裁，而使获得仲裁的信息帧不受任何损坏地继续传送。

CSMA/CA 媒体访问控制模式的最大缺点就是：网络上不同的站点发送数据时，首先要对传输信道进行侦听，来避免碰撞，导致数据传送的实时性变差。在 CAN 总线技术中，尽管使用了 CSMA/CA 媒体访问控制模式，但同时有实施优先级控制机制，使得具有高优先权的数据帧可以不受阻碍地立即传送，避免了 CSMA/CD 媒体访问控制模式的缺点。

CAN 总线的主要缺点是：CAN 总线挂接负荷的能力不是很强，因为 CAN 总线可挂接的设备

数量最多为 110 个，对于智能楼宇来讲，楼宇控制系统中要监测的控制点数可能很大，因此不能满足整个智能楼宇的需求。解决的办法是：使用中继器对 CAN 总线网段进行扩展，从而解决挂接大量监控点的系统使用问题。

3. CAN 通信节点和报文帧

（1）CAN 通信节点

CAN 总线技术中的 CAN 通信控制器芯片就是一个 CAN 总线中节点的重要组成部分。要构成一个具有 CAN 通信能力的控制应用节点，一般还需要有 CPU 的支持。一个 CAN 通信节点就是由 CAN 通信控制器、一定位数的 CPU（高性能 16 位 CPU 或高性能 8 位 CPU）以及部分外设及存储器组成的应用节点。CAN 通信节点通过模拟与数字 I/O 接口与其他通信组件或设备相连。

CAN 通信节点可以直接挂接在总线上使用。由于考虑到总线信号的驱动能力、短路保护、过热保护等环节，实际使用 CAN 通信节点时，一般在在总线与 CAN 通信节点接口之间增加一个 CAN 总线收发器。

（2）CAN 总线通信中的报文帧

CAN 总线上的通信是通过报文帧来实现的。报文帧分三种类型：即数据帧、远程帧和错误帧。每一个报文帧都由特定的结构组成，报文帧内都具备一些字段，对发送的帧类型做出定义，并提供相关信息。比如，数据帧由 6 个字段组成，分别是仲裁字段、控制字段、数据字段、CRC（循环冗余校验）字段、确认字段以及帧结束字段。在帧发送期间，仲裁字段被网络中的每个节点用来识别或解决碰撞；仲裁字段还用来识别报文的类型及其发送目的地；控制字段定义了数据帧的长度；数据帧包含数据，其字节数在控制字段中作了规定；CRC 字段用来检测数据错误。最后，每次发送均需取得 CAN 总线上所有接收节点的确认帧。

4. 使用 CAN 组织系统方式灵活

工业控制和楼宇自动化控制中，大量地使用 RS-232/RS-485 串行总线，在 CAN 总线应用系统中，可以方便地接力传递 RS-232/RS-485 数据块，如图 1-21 所示。

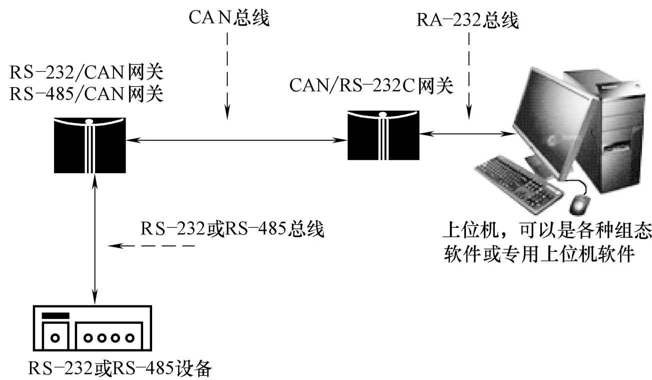


图 1-21　接力传递 RS-232/RS-485 数据块

CAN 总线和以太网组成的数据传输方案如图 1-22 所示。

CAN 总线能够在安全运行要求较高的应用环境中进行可预测的可靠通信，可以通过仲裁划分报文的优先级，硬件和数据链接层配置灵活。但 CAN 总线技术不适合在有防爆要求的场所使用，对于这位一点，应用时务必注意。

1.4.6　EIB

1. EIB 及主要技术特点

欧洲安装总线（European Installing Bus，EIB）在欧洲的楼宇自动化（BA）和家庭自动化

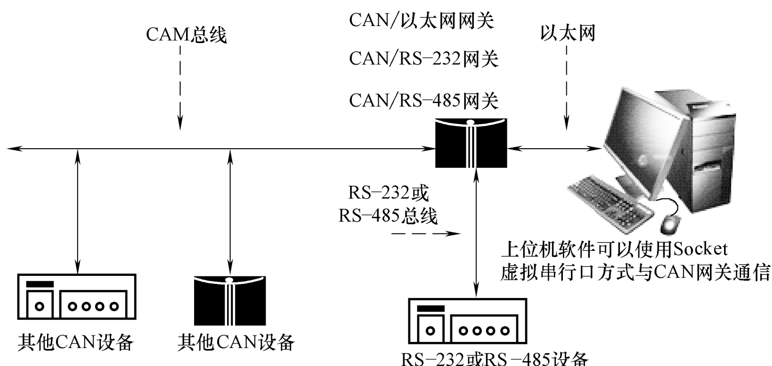


图 1-22　CAN 总线和以太网组成的数据传输方案

（HA）领域中有着广泛的应用，是欧洲安装总线协会创建的一种 EIB 标准。EIB 技术可以采用多种不同的网络传输介质，如用双绞线、电力线、同轴电缆、无线介质等，但大多数应用场合中使用双绞线和电力线。使用双绞线时，每个物理网段可长达 1000m，传输速率为 7.6kbit/s；使用电力线时，最大传输距离为 600m。

EIB 应用于 BA 和 HA 领域中，有着较优良的性能，已经被美国消费电子制造商协会（CEMA）吸收作为住宅网络 EIA-776 标准。使用 EIB 组成的系统开放性、互操性较好，灵活性高。EIB 协议没有使用“控制中心”结构，在应用于楼宇的智能控制中，如采暖通风空调、照明、安防和时间事件管理控制过程中，有以下 4 个主要特点：

（1）分布式结构

无控制中心分布式结构，使被控系统能够处于一个高效率的运行状态中，布线量小，安装费用低廉。

（2）互操性

开放性结构与组编址通信的结合使系统内的设备具有良好的互操作性。

（3）灵活性

EIB 对多种传输介质的支持，尤其是对电力线传输和无线传输方式的支持，使系统组建和扩充简化。

（4）系统的其他一些特点

1）采用 DC24V 供电；

2）采用 CSMA/CA 媒体访问技术；

3）使用优先权定义，处理监测控制的实时性；

4）控制电缆和电力电缆被单一多芯电缆替代。

EIB 最大的特点是用单一多芯电缆替代了传统上分离使用的控制电缆和电力电缆，总线电缆可以以总线型、树形或星形拓扑结构铺设，系统规模调整便利。智能化的控制器可以通过编程来实现不同的功能和应用场所。EIB 应用系统具有高度的灵活性和开放性，只要是基于 EIB 协议开发的电气设备可以完全兼容。

2. EIB 系统的基本结构

EIB 系统的基本结构是使用支线（Line）挂接元件，线路耦合器（Line Coupler）最多可以将 15 条支线连接为一个区域（Area），还可以通过干线耦合器（Backbone Line Coupler）将 15 个区域连接成一个大点数系统。

EIB 协议应用两种类型的地址：物理地址和组地址。在 EIB 系统中，对于每一个总线元件都

分配了惟一的物理地址。物理地址的数据结构组成包括域、线和元件标识3个部分。3个部分之间用一个点来分开：如7.13.51，7是域地址，13是线地址，51是元件地址。组地址通过电信号用于多个接收元件之间的通信，这些接收元件构成了一个组。组地址是一个用功能连接的地址，并且不同的级用一个斜线分隔开来。

3. EIB网络的拓扑结构

EIB网络是一个完全对等的分布式网络，网络内的设备具有同等的地位，EIB网络采用了域（Domain）、区（Area）、线（Line）的三层级结构。最下层的每一条线上最多可以连接255个设备，第二层的每个区最多可容纳15条线。最顶层的一个域则可容纳15个区。使用线耦合器、区耦合器实现连接。线地址为8位，区地址为4位、线地址为4位。EIB网络没有使用控制中心的结构，提高了控制系统的工作可靠性，网络中的某一节点出现故障，不会造成系统瘫痪，当监控点数较多时，不会形成有控制中心结构的网络中出现的中心信息拥塞的问题。

4. EIB通信协议和系统性能

（1）EIB通信协议

EIB技术的通信协议采用了OSI七层参考模型。EIB通信协议通过使用优化防碰撞的方法避免了载波侦听多路访问的媒体访问控制方式控制媒体接口来达到提高系统控制的实时性和可靠性。

EIB网络中，组成系统的基本单元为总线耦合单元和应用单元。总线耦合单元中，固化了EIB的部分通信协议，实现了设备与总线间的数据交换。在总线耦合单元基础上，不同的应用环境选择不同的应用单元。

EIB技术应用于楼宇自动化系统，应用系统的无中心真正分布式模式，具有良好的开放性、灵活性。但EIB网络的传输速率不高，仅为9.6kbit/s。

（2）EIB应用系统的性能描述

EIB应用系统的系统参数、数据传输特性如下：

1）最大单条电缆长度（包括分支）1000m；

2）最大装置与电源长度350m；

3）最大装置间距700m；

4）系统组网规模灵活；

5）区域数15个；

6）每区域线路数15个；

7）每线路并一线装置数64个（可扩充至256个）；

8）数据存取方式：分布式总线存取（CSMA/CA）；

9）数据传输方式：串行异步传输；

10）数据传输速率：9.6kbit/s。

5. EIB传输介质

EIB支持多种传输介质，如双绞线、电力线、无线电波。其中双绞线系统是应用最广泛的介质，它采用2×2×0.8的标准EIB，具有良好的抗干扰性。电力线系统多用于对旧建筑的改建，利用建筑中敷设的电力线作为载体传送信号。无线和红外系统则用于一些难以敷设线路的场合。

EIB系统中，控制为对等控制方式，不同于传统的主从控制方式，总线采用四芯屏蔽双绞线，其中两芯为总线使用，另外两芯备用。所有元件均采用DC24V工作电源，并且DC24V供电与电信号复用总线。

1.4.7　CEBus

1. CEBus 对应的标准

CEBus（消费电子总线），标准是美国电子工业协会（EIA）的开放标准（EIA-600）。CEBus 描述了家庭电子产品之间的通信方法，通过 CEBus 可实现家庭网络的组网，该标准采用了简化的 OSI 参考模型：分为物理层、数据链路层、网络层和应用层。

CEBus 的物理层使用了 5 种不同的传输介质：电力线、双绞线、同轴电缆、射频广播和红外线。CEBus 网络是一个完全面向报文分组的对等网络，使用载波侦听多路访问/冲突检测（CSMA/CDCR）。CEBus 的数据传输速率为 10kbit/s，一个 CEBus 信息由报头和数据包组成，报头是 CSMA/CDCR 协议的一部分，发送方用侦听传输介质中是否有其他发送方占用信道，以获取对传输通道的控制权。

人们知道，低压电力线是家庭中分布广泛的有线物理线缆，几乎所有家用电子设备都挂在 220V 的电力线上，如果用低压电力线来实现家庭网络中许多设备的控制，不需要重新布线就可以实现。CEBus 在应用层定义了一种“公共应用语言”来实现网络设备的通信。

2. CEBus 协议模型

CEBus 是参考了 ISO 的 OSI 七层参考模型设计的，采用了其中的四层级结构，如图 1-23 所示。

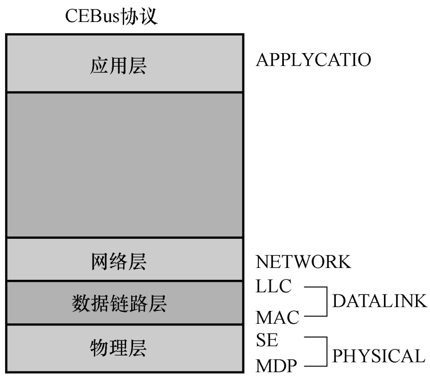


图 1-23　CEBus 协议模型

（1）物理层

物理层又分为 SE 子层和 MDP 子层。SE 子层的作用是在发送和接收的过程中进行编码和解码，MDP 子层作为与物理介质的硬件接口，完成数据信息的发送和接收。

CEBus 是一个开放系统，它的物理层定义了在几乎所有传输介质中信号的传输标准（如电力线、双绞线、同轴电缆线、光纤、红外线和无线电等），并要求控制信号在所有的介质中都要以相同的传输速度（10kbit/s）传送。

（2）数据链路层

数据链路层可以分为逻辑链路控制（LLC）和媒体访问控制（MAC）子层。在发送数据时，MAC 子层将来自 LLC 子层的链路层协议数据单元（LPDU）包打成 MAC 层协议数据单元（MPDU）包，再发送给物理层的 SE 子层，MPDU 包就是 CEBus 网络传输的数据帧结构。在接收数据时，MAC 子层将来自 SE 子层的 MPDU 包进行解包，得到 LPDU 包，发送给 LLC 子层。LLC 子层是个空壳，只转发命令，不承担其他工作。数据链路层保证正确收发数据帧，发送的数据帧分为响应和无响应带地址和不带地址广播和非广播的。此外，数据帧有高、正常、低 3 个优先级，可以满足不同种类数据传输对实时性的要求。

（3）网络层

网络层的主要功能是为了连接不同的物理媒体，例如连接在双绞线和电力线上的设备之间要传递信息，就必须通过网络层来转发。网络层负责路由、确定网络、流量控制等。

（4）应用层

应用层包括了 3 个子层：消息传递子层（Message Transfer Layer），可传递四种类型的消息；CAL（Common Application Language，公共应用语言）子层，解释执行 CAL；用户子层，根据 CAL 执行的结果来控制设备的运行。应用层通过 CAL 和应用程序连接。CAL 是 CEBus 专为设备之间

相互通信而设计的面向对象的 CAL，一个设备就是一个对象。网络资源的分配和控制也通过 CAL 来完成。

3. 低压电力线信道状况

由于 220V 的电力线广泛存在于家庭和楼宇中，使用这种低压电力线作为一种总线网络实现对许多对象的监控是很便利的。但由于电力线与双绞线等专用网络介质不同，用电力线实现数据通信必须考虑其特殊性，表现为干扰的复杂性、信道的时变性。

电力线受到的干扰有人为干扰和非人为干扰，如雷电干扰将导致电力线数据通信的瞬间失序和错乱，但可以通过数据自动重发机制和纠错机制来进行数据流纠错；连接在电力线上的用电设备在工作中也会对正在传输数据的电力线构成更为频繁的严重干扰。

一般情况下，家用电子设备中含有开关元件对交流电波形进行斩波的电子线路，家庭中的空调器、电风扇等设备的运行会产生大量的谐波，这些谐波的频谱覆盖的频段宽，可能部分覆盖信号频谱，造成信噪比的降低，导致误码率的增加。

使用电力线做 CEBus 网络的传输介质时，要考虑以上诸种干扰对网络数据流的干扰和影响。

1.5　工业以太网与实时以太网

1.5.1　工业以太网及其特点

用于工业控制系统的以太网统称为工业以太网。IEC 标准委员会 SC65C-2004 对工业以太网作出的定义是：工业以太网是用于工业自动化环境，符合 IEEE 802.3 标准，按照 IEEE 802.1D“媒体访问控制（MAC）网桥”规范和 IEEE 802.1Q“局域网虚拟网桥”规范，对其没有进行任何实时扩展而实现的以太网。工业以太网是应用工业控制环境的控制网络，通过采用减轻以太网负荷、提高网络速度、采用交换式全双工通信模式、流量控制及虚拟局域网等技术提高网络的实时响应速度，技术上与商用以太网兼容。

换句话讲，工业以太网是指其在技术上与商用以太网（IEEE 802.3 标准）兼容，但材质的选用、产品的强度和适用性方面应能满足工业现场的需要，即在环境适应性、可靠性、安全性和安装使用方面满足工业现场的需要。

工业以太网在技术上与 IEEE 802.3 兼容，与商业以太网应用环境不同的是，工业以太网应用在工业环境当中，要考虑高温、潮湿、振动，还有对工业抗电磁干扰和抗辐射有一定要求，如满足 EN 50081-2、EN 50082-2 标准；而商业以太网应用在办公室环境中，无需满足这些工业标准。表 1-3 列出了一些常用工业标准。为改善网络运行具有较好的抗干扰性和抵御外界电磁辐射以及自身向外的电磁辐射，工业以太网产品多使用多层电路板或双面电路板，设备外壳多采用金属（如铸铝）形式来屏蔽干扰；由于交换机、收发器应用在工业环境中现场电源品质较差，故常采用双路直流电或交流电为其供电；为考虑方便安装，工业以太网产品及设备多采用 DIN 导轨或面板安装。工业以太网和商业以太网在通信介质选择方面一般有较大的不同：办公室环境下以太网布线线缆多使用 UTP（非屏蔽双绞线），而在工业环境下推荐用户使用 STP（屏蔽双绞线）和光纤。

20 世纪 90 年代末，工业以太网成功应用于 DCS，工业以太网技术开始向现场设备层延伸，直接应用于工业现场设备间的通信，工业以太网技术迅速在发展，表现在：基于工业以太网的控制系统体系结构、确定性通信技术、总线供电技术、网络安全技术、基于 XML（可扩展标记语言）的设备描述技术等方面都获得了巨大进步。

表 1-3　一些常用工业标准

标　　准	测 试 方 法	描　　述
EN55024	EN61000-4-2	静电放电
EN55024	EN61000-4-3	抗辐射干扰
EN55024	EN61000-4-4	快速瞬态脉冲
EN55024	EN61000-4-5	浪涌电压
EN55024	EN61000-4-6	传导干扰
EN55024	EN61000-4-11	瞬降瞬断电压
EN55022	CISPR22	辐射放射
EN55022	CISPR22	传导辐射

工业以太网技术的优点表现在：以太网技术应用广泛，为所有的编程语言所支持；软硬件资源丰富，价格适中；非常便于同 Internet 连接，实现办公自动化网络与工业控制网络的无缝连接；技术不断创新，应用领域不断扩大，可持续发展的空间大等。

1.5.2　工业以太网作为控制网络的技术优势

工业控制网络不同于普通数据网络的最大特点在于它必须满足控制实时性的要求，即信号传输要足够快的同时满足信号的确定性。以太网具有以下优点：

1）具有相当高的数据传输速率，从 10Mbit/s、100Mbit/s 增大到如今的 1000Mbit/s、10Gbit/s，能提供足够的带宽，并且使用相同的通信协议。

2）以太网使用 TCP/IP 协议簇很容易实现各种规模网络的系统集成，尤其是在控制领域内，能将控制域网络和管理域网络实现很好的无缝集成。

3）全双工通信又使得端口间两对双绞线（或两根光纤）上分别同时接收和发送报文帧，不会发生碰撞。

4）采用星形网络拓扑结构，交换机将网络划分为若干个网段，使以太网的通信确定性和实时性大大提高。

5）稳定性与可靠性。在实际应用中，主干网可采用光纤传输，现场设备的连接则可采用屏蔽或非屏蔽双绞线，对于重要的网段，还可采用冗余网络技术，以此提高网络的抗干扰能力和可靠性。

与专门为工业控制而开发的现场总线相比，工业以太网技术的优点表现如下：

1. 直接继承了以太网技术中的许多特点和优势

工业以太网技术直接继承了以太网技术中的许多特点和优势，将这些特点和优势直接移植到工控领域中来，并作了适当改进形成工业以太网技术。以太网技术应用广泛，为大量的编程语言所支持，支持以太网技术及应用系统的软硬件资源非常丰富，能够非常便利地与 Internet 连接，实现办公自动化网络与工业控制网络的无缝连接；紧紧地依靠计算机网络发展的主流技术并与之同步发展，未来的发展应用前景光明、清晰。

2. 通信的确定性

工业控制网络必须满足对实时性的要求，即带宽高、确定性好。以太网早已进入 100Mbit/s、1000Mbit/s 和万兆应用的传输速率水平，这就大幅减小了过去采用 CSMA/CD 以及二进制指数退避算法通信的非确定性。在数据吞吐量相同的情况下，通信速率的提高意味着网络负荷的减轻，网络碰撞几率大大下降，提高了网络的确定性。

在一个用双绞线（光缆）连接的全双工交换式以太网中，交换机内部的电路交换结构中的一对线用来发送数据，另一对线用来接收数据，消除了数据传递碰撞的可能性。

3. 工业以太网的可靠性和安全性

传统的以太网是为办公及商业领域应用而设计的，并没有考虑苛刻的工业现场环境的需要（如冗余电源供电、高温、低温、防尘、有害有毒气体的存在等），因此不能将商用以太网技术及产品直接应用在有较高可靠性要求的恶劣工业现场环境中。

工业以太网解决了控制网络在工业应用领域和极端条件下稳定工作的问题，国外一些公司专门开发和生产了导轨式集线器、交换机产品，并安装在标准 DIN 导轨上，同时配有冗余供电，接插件采用牢固的 DB-9 结构，而在 IEEE 802. 3af 标准（关于以太网供电技术的以太网标准的扩展标准）中，对以太网供电规范也进行了定义。

在工业生产过程中，很多现场不可避免地存在易燃、易爆或有毒的气体，应用于这些场合的设备都必须采用一定的防爆措施来保证工业现场的安全生产。现场设备的防爆技术包括两类，即隔爆型和本质安全型。与隔爆技术相比较，本质安全技术采取抑制点火源能量作为防爆手段，其关键技术为低功耗技术和本质安全防爆技术。由于目前以太网收发器本身的功耗都比较大，工作电流多在 60 ~ 70mA（5V 工作电源），低功耗的以太网本质安全现场设备设计较难，所以在目前的技术条件下，对以太网系统可采用隔爆型防爆的措施，确保现场设备本身的故障产生的点火能量不泄漏。

在有较强电磁干扰和噪声振动的场所，通过器件、设备的组织，工业以太网也有很好的抗此类干扰的能力。

4. 控制域与管理域实现无缝集成

使用工业以太网能够便于实现控制域与管理域的无缝集成。两个异构网络通过网关互联实际上将控制域与管理域进行了分割，在两个隔离域中的软硬件系统彼此一般无法直接进行数据交换。

5. 能够非常便利地实现对 Internet 的接入

使用工业以太网作为控制系统的通信网络架构时，控制系统可以很方便地接入 Internet，这样一来，控制系统具有了优良的远程监控性能。

当然，工业以太网非常便于实现了与 Internet 的无缝集成，实现了工厂信息的垂直集成，但同时也带来了一系列的网络安全问题，包括病毒、黑客的非法入侵与非法操作等网络安全威胁问题，可采用网关或防火墙等方法，将内部控制网络与外部信息网络系统彼此隔离；还可以通过权限控制、数据加密等多种安全机制来加强网络运行的安全。

1. 5. 3　实时以太网

将现场总线的实时性与以太网通信技术相结合并适合于工业自动化并有实时能力的以太网叫做实时以太网。工业控制的基本要求就是控制的实时性和可靠性，实时以太网就能满足这种要求。根据 IEC/SC65C/WG11 定义，所谓实时以太网，是指不改变 ISO/IEC 8802-3、CSMA/CD 的通信特征、相关网络组件或 IEC 61588 的总体行为，但可以在一定程度上进行修改，满足实时行为，包括确保系统的实时性，即通信确定性、现场设备之间的时间同步行为、频繁传输且较短长度的数据交换。

对于工业控制过程来讲，实时性要求划分为以下 3 种情况：

1）应用于信息集成和要求较低的过程自动化控制场合，实时响应时间为 100ms 或更长。

2）多数工厂自动化应用场合中，实时响应时间要求最少为 5 ~ 10ms。

3）对于高性能的同步运动控制应用，尤其是在监控节点较多的伺服运动控制应用场合，实时响应时间要求短于 1ms。

实时以太网是工业以太网的一种，可以认为实时响应时间短于 5ms 的工业以太网就是实时以

太网。实时以太网更便于和标准以太网实现无缝连接。

实时以太网除了实现现场设备之间的实时通信外，还支持传统的以太网通信，例如办公网络。这样就能够便于将办公网络和现场控制网络无缝互连，甚至可以使办公网络和现场控制网络一体化。

1.5.4 灵活组织控制网络的架构

如果控制系统对控制的实时性要求并不是很高，就可以使用普通以太网，加上在控制网络设计之初就注意有效配置网络负荷，使得基于普通以太网通信技术的控制网络，也可以满足一些对实时性要求不那么高的监控系统的需求，如楼宇自动化控制等。

基于普通以太网技术的控制网络在控制领域中可以充分发挥出普通以太网所具有的技术成熟、软硬件丰富、性价比高等优势。基于普通以太网的控制网络，所采用的技术相对成熟，已经有了一些应用实例，但其应用范围要受到实时性要求的限制。

1.5.5 关于实时以太网的 IEC 61784-2 标准

早在 2003 年 5 月，IEC/SC65C 成立了 WGll 工作组，为适应实时以太网市场应用需求，制定实时以太网应用行规国际标准。2005 年 3 月 IEC 实时以太网系列标准作为 PAS（Publicly Available Specification，国际通用规范）文件通过了投票，并于 2005 年 5 月在加拿大将 IEC 发布的实时以太网系列 PAS 文件正式列为实时以太网国际标准 IEC 61784-2。IEC 61784-2 定义了系列实时以太网的性能指标以及一致性测试参考指标。

IEC 61784-2 中的实时以太网通信标准见表 1-4。

表 1-4 IEC 发布的实时以太网系列 PAS 文件

协 议 簇	以太网总线技术名称	IEC/PAS 标准号
CPF2	Ethernet/IP	IEC/PAS 62413
CPF3	PROFINET	IEC/PAS 62411
CPF4	P-Net	IEC/PAS 62412
CPF6	INTERBUS	
CPF10	VNet/IP	IEC/PAS 62405
CPF11	TCNet	IEC/PAS 62406
CPF12	EtherCAT	IEC/PAS 62407
CPF13	Ethernet Powerlink	IEC/PAS 62408
CPF14	EPA	IEC/PAS62409
CPF15	ModBus-RTPS	IEC/PAS 62030
CPF16	Sercos-III	IEC/PAS 62410

在 IEC 发布的实时以太网系列 PAS 文件中，我国的 EPA（Ethernet for Plant Automation，工厂自动化以太网）实时以太网提案于 2004 年 1 月 22 日的 IEC/SC65C/JWG10，WG11、WG12、WG13 4 个工作组联合大会和工作组会议上，一致通过在 2004 年 11 月以前，将包括我国自主开发的工业控制网络协议 EPA 在内的 6 种目前非国际标准以太网技术作为 IEC 的 PAS 文件出版，2007 年 10 月 5 日正式成为实时以太网国际标准应用行规 IEC 61784-2。

1.6 BACnet 标准支持的控制网络

1.6.1 楼宇自控系统通信网络架构

楼宇自控系统（BAS）种类很多，按照通信网络架构来划分，主要分为两大类：使用层级结

构的 BAS 和使用通透以太网的 BAS。

1. 使用层级结构的 BAS

BAS 的中央管理工作站挂接的网络是管理网络，现场的控制器挂接的网络是控制网络，控制网络可以由不同的控制总线来构建，较为复杂的 BAS 在控制网络层级还分为几个逐次不同的层级，表现在挂接的控制器也分为不同的层级。通信网络架构由管理网络层和控制网络层组成，这样的 BAS 叫使用层级结构的 BAS。

多数使用层级结构的 BAS 在控制网络上使用 1 ~ 2 个层级。江森公司 Matasys BAS 就是这样的结构，如图 1-24 所示。

图 1-24 描述的层级结构的系统就是江森楼控系统，系统的第一层网络是管理网络，是遵从 TCP/IP 的以太网，第二层的控制网络是 LonWorks 控制总线，LonWorks 总线使用 LonTalk 协议，数据的传输速率为 300bit/s ~ 1.25Mbit/s。连接控制网络和管理网络之间的是 NCU（Net Control Unit，网络控制器）。

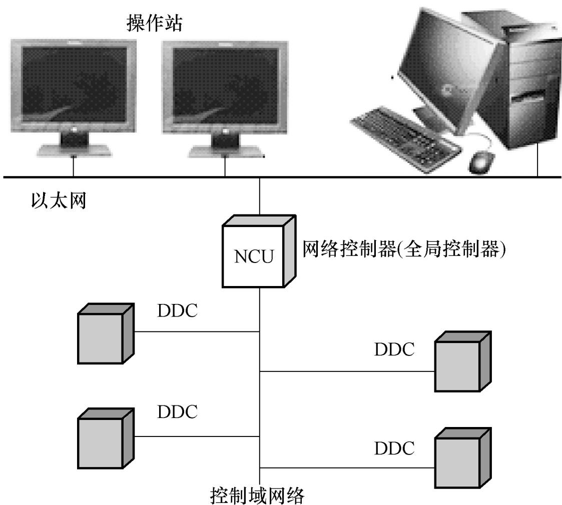


图 1-24　层级结构的 BAS

使用层级结构的楼控系统通信网络架构由控制域网络和管理域网络两个层级构成，两个层级间通过网络控制器（全局控制器）实现互连。

一部分使用层级结构的楼控系统在控制网络层级上又分出了一些子层，构成多层级结构的系统。

2. 使用通透以太网的楼控系统

采用通透以太网的楼宇自控系统结构如图 1-25 所示。在这种结构的系统中，管理网络和控制网络都使用以太网，而且管理网络和控制网络都接入同一个以太网内。

这种结构的楼控系统通信网络的协议环境是 TCP/IP 协议簇。

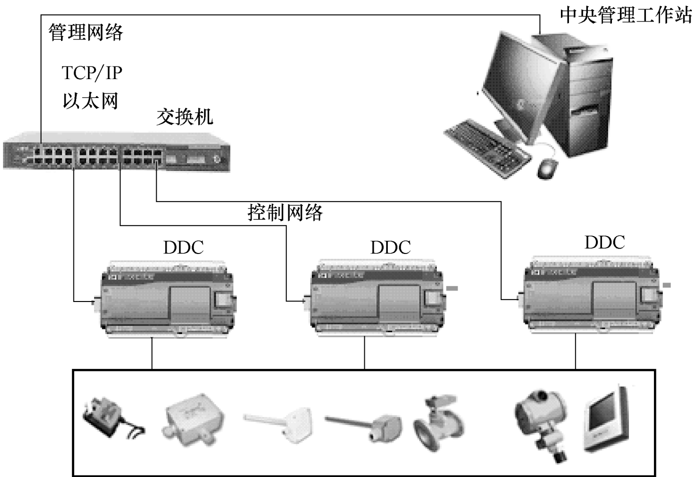


图 1-25　采用通透以太网的楼宇自控系统结构

1.6.2　BACnet 支持的控制网络

楼控系统的控制网络种类林林总总，楼控系统的结构种类也较多，这就导致了楼控系统的开放性差这样一种格局。为了大幅度提高楼宇自控系统的开放性，美国暖通空调工程师协会于 1995 年推出了 BACnet（楼宇自动控制网络）数据通信协议。BACnet 协议的推出、应用和推广确实大幅度地提高了楼控系统的开放性与控制性能。

在设计基于 BACnet 协议的楼控系统时，选择合适的控制网络是系统设计的基础。BACnet 标准定义了 6 种楼宇自控网络，即 BACnet 协议支持 6 种控制网络：以太网（Ethernet，数据传输速率 100Mbit/s）、ARCnet（数据传输速率为 2.5Mbit/s）、MS/TP 子网（主-从/令牌传递 Master/Slave/Token Passing 数据链路协议，传输速率 76.8kbit/s）、PTP（点对点）通信网络、LonWorks 网络和 BACnet/IP 网络。关于 BACnet 协议支持的 6 种控制网络，将在后面详细论述。

1.7　楼宇自控系统中常用控制网络和底层控制网络的选择

1.7.1　楼宇自控系统中常用的控制网络

楼宇自控系统中常用到的控制网络主要有以下一些：

1）LonWorks 网络；

2）BACnet；

3）CAN 总线；

4）ModBus；

5）PROFIBUS；

6）DeviceNet 总线；

7）EIB；

8）工业以太网；

9）BACnet 标准支持的几种控制网络：BACnet 标准中除了支持 LonWorks 网络、以太网以外，还支持 PTP 构建的网络、BACnet/IP 网络、ARCnet，还有一种在 BACnet 系统中应用较为广泛的 MS/TP 控制总线；

10）RS-232 、RS-485 控制总线。

在楼宇自控系统中，传统的通信总线用得很多，如串行通信总线 RS-232C（RS-232A，RS-232B）、RS-422A 和 RS-485 总线等。

1.7.2　底层控制网络的选择

1. 底层控制网络种类

1）传统的通信总线；

2）现场总线；

3）基于 TCP/IP 的工业以太网等。

2. 底层控制网络选择原则

1）可靠性高；

2）满足具体应用场所获得通信速率和通信距离要求；

3）满足先进性、实用性与经济性相结合的原则；

4）抗干扰能力强。

第 2 章　BACnet 标准概述

2.1　BACnet 标准

2.1.1　BACnet 标准的推出

长期以来，楼宇自控系统（BAS）开放性非常差是业界要解决的最为紧迫的问题之一。在一个完整的开放性 BAS 中，一般并不要求系统的所有组成单元都是同一个厂家生产的设备，开放性的要求就是：各个不同单元的设备及核心组件应该不受约束地由大量不同厂商供给，用户不受限制地取舍各个厂家的设备组织系统。换言之，只要是相同功能的组件和设备，不同厂商的产品都能够互换互用和互连互通。但过去的很长一段时间里，BAS 的开放性较其他工控系统要差得多，某厂商生产的一套 BAS，其核心组件和设备只能是该厂商自己生产和提供的，如果要使用其他厂商生产的 BAS 专用系统，解决方案多采用专用网关实现异构系统的互连，这种方法受到很大制约，专用网关开发困难，但 BAS 的硬件设备及软件系统升级换代非常快，为了实现这种系统升级，网关也必须经常重新开发和更新，这样做的后果是实现难度很大以及费用高昂。

20 世纪 80 年代初期，DDC（Direct Digital Controler，直接数字控制器）已经成为 BAS 中广为使用的核心控制设备和组件，由各设备生产厂商独立开发 DDC 设备和系统，一般都自成体系地形成了彼此独立的专用 DDC 系统，于是导致不同厂商的楼控系统无法进行或很难于进行系统集成。这就导致大幅度降低整个系统的效能，对于系统的运行、维护和升级都极为不利，这些工作必须依赖提供设备及成套系统的单一厂商来进行，用户的利益不能够被保证，无法进行公平竞争，阻碍了楼宇自控技术的发展和更深入的应用。

为了克服传统的 BAS 开放性差及随之带来的很多问题，美国采暖、制冷和空调工程师协会（American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE）组织了世界各地来自楼宇自控领域的大学、控制器制造商、政府机构与相关部门的顶尖科学家和工程师组成了一个名为“SPC135P”的工作组。工作组的目标是制定一个关于楼宇能量管理与控制系统的通信协议或技术标准。经过长达 8 年的制定、修改及反复修订，终于在 1995 年 6 月正式制定和发布了世界上第一个楼宇自控网络的标准——BACnet“A Data Communication Protocol For Building Automation and Control Network”。该标准是一个 BAS 厂商和用户都能普遍接受的技术标准，它吸纳了先进的技术、开放性优良，其应用系统易于扩展和实现。BACnet 协议获得通过，成为 ASHRAE135—1995 标准，同年 12 月成为美国国家标准，正式命名为“ANSI/ASHRAE 135—1995-A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Network（ANSI/ASHRAE 135—1995 楼宇自控网络数据通信协议）”，简称“BACnet—95”。

BACnet 标准的推出是楼宇自控技术发展中的一件大事。现代建筑越来越多地装备了 BAS，BAS 由多个异构的子系统组成，要使整个系统协调高效运行就要进行系统集成。要集成就需要实现相关的机电设备和子系统具有开放性、互通信及互操作能力。即要求 BAS 内的设备和系统的数据通信必须按同一标准协议来进行。

2.1.2　BACnet 标准的推广

BACnet 标准开拓性地应用在 BAS 中，它对于推进不同厂商生产的设备与系统在互连和互操

作的基础上实现无缝集成发挥了重大的作用。

BACnet 是一个关于楼宇自控设备数据通信的统一标准，按照这种标准生产的设备都可以进行信息交换，实现互操作。BACnet 标准只规定了楼宇自控设备之间要进行“对话”和数据信息交流必须遵守的规则，但不是具体地实现这些规则。

ASHRAE 推出的 BACnet 很快在业界进行了推广，并在不同的国家得到认同。

关于 BACnet 标准的重要历史事件如下：

1）1995 年被批准成为美国标准（ANSI/ASHARE 135—1995）；

2）1998 年被欧共体标准委员会 CENTC247 采纳；

3）1999 年被韩国采纳为国家标准 KSX6909；

4）2000 年成为日本国家标准 IEIEJ/P；

5）2003 年 1 月 18 日正式成为国际标准 ISO 16484-5；

6）2000 年 9 月在北京 BACnet 协议被翻译成中文版，并正式提交给中国智能建筑协会。

随着 BACnet 标准在不同国家范围内的推广，BAS 的生产厂商越来越多地采用该标准设计和生产各类直接数字控制器、网络控制器和网关产品，并应用于新的系统中。

BACnet 标准一直由 ASHRAE 的 SSPC-135 委员会管理并持续完善。BACnet 标准推出的目的是为了使不同生产商提供的控制设备能够互操作，使用户不再依赖特定的私有协议和技术。BACnet 的每一种标准对象包含一组标准属性。每个属性的值确定了每个对象的惟一性，比如模拟输入对象的实时值；系统中的 BACnet 设备可以为其他 BACnet 设备提供服务，根据提供的服务方式来分类；BACnet 设备可以是一个简单的智能传感器到复杂的楼宇控制器。

我国是投票赞成 BACnet 成为国际标准的国家，但是至今还不是我国的国家标准。西方发达国家以及韩国、日本都早已将 BACnet 标准转换为各自的国家标准，在这点上，反映了我国在建筑智能化、信息化技术领域自主开发能力以及与国外先进技术的同步发展能力还是处于较落后的水平。

2.1.3 采用 BACnet 标准构建 BAS 的优点

制定 BACnet 标准的初衷是：定义采暖、通风、空调和制冷控制设备（简称 HVAC&R）的监控计算机及控制分站进行数据通信的服务和协议，当然这里的设备还包括其他的 BAS 的监控计算机及智能控制器。此外，为设备之间信息交互与数据通信的发送、接收、存储和处理过程定义了抽象化的对象模型，从而简化了楼宇中数控技术的应用与使用。简言之，制定 BACnet 标准的主要目的是：通过 BACnet 标准的推出实现大幅度提高 BAS 的开放性、互操作性，并大幅度提高 BAS 的系统集成水平。

应用 BACnet 标准的 BAS 具备以下显著的特点：

1. 节约系统整体投资

由于生产厂商按照 BACnet 标准组织生产 BAS 的核心组件及相关设备，避免使用专用协议设备和系统，因此 BAS 具有很好的开放性，不同厂商生产的核心设备可互换互用、互连互通，在用户选择使用 BAS 时，完全可以做到在多厂商中竞标的情况下择优选用价格合理、技术先进可靠的设备和系统。另外，进行设备现场安装时，大幅度降低安装、连接和组织系统时的难度，减少现场安装费用。

2. 系统开放性好

按照 BACnet 标准组织生产 BAS 的核心组件及相关设备独立于任何制造商，不需要专门的芯片，并得到众多制造商的支持，构成系统的开放性大幅度提高。按标准制造的产品有严格的性能等级和完整的说明。

3. BAS 的通信过程使用统一、先进的数据表示和交换方法

BACnet 标准提供了完善和良好的数据表示和交换方法，除了提高 BAS 的开放性以外，还可以大幅度提高 BAS 通信网络和整个系统的效能。

4. 进行系统改造、升级和扩展时费用低

由于 BACnet 采用开放性策略，使众多厂商可以遵循 BACnet 标准进行技术开发并参与竞争，从而对原有设备系统或老系统进行改造、升级和扩展的费用降低。

5. 运行费用降低

采用 BACnet 标准时，BAS 不仅整体系统投资降低，由于有众多厂商可以提供维保服务，系统运行费用降低。

6. 技术先进可靠

按照 BACnet 标准组织生产的 BAS 技术先进、可靠，加之科学、合理的竞争，用户选用的系统可以保证很好的技术先进性和可靠性。

7. 系统集成水平可以大幅提高

BAS 中的核心组件、设备和产品有良好的互操作性，有利于系统的扩展和集成。

2.2 SPC 135P 及工作组

1987 年，美国“Energy User News（能源用户新闻）”组织了“Standardizing EMS Protocols（标准化能量管理系统协议）”会议，会议决定成立由 ASHRAE 资助的“Standard Project Committee135P”技术委员会，简称“SPC 135P”。该委员会的目标是制定一个开放的智能建筑自控网络通信协议标准，实现不同厂商生产的楼宇自控设备互连的过程中实现互通信和互操作，提高物业运行和管理效率，达到节能和增强建筑功能的目的。SPC 135P 委员会和 ASHRAE 在制定和发布了 BACnet 标准后，SPC 135 委员会的新任务就是：解释、维护、推广和发展 BACnet 标准。由于与飞速发展的现代通信技术、信息技术、控制技术、计算机网络技术关系极为密切，因此 BACnet 标准也面临着发展和完善的任务。为此，SPC 135 委员会下设了 13 个工作组（Working Group）：

1. 应用工作组（The Applications Working Group，AP-WG）

进一步制定指导实际工程应用的行规，如“冷水机组功能行规”、“变风量空调机组末端（VAVBox）控制器功能行规”等。

2. IP 工作组（The Internet Protocol（IP）Working Group，IP-WG）

研究和制定 Internet 技术在 BACnet 标准中的应用，其中包括 NAT（Network Address Translation，网络地址转换）、防火墙技术和 IPv6 技术在新的 BAS 中的应用，当然包括从 IPv4 到 IPv6 过渡期间的应对举措；维护和完善 BACnet/IP 标准。

3. 照明应用工作组（The Lighting Applications Working Group，LA-WG）

研究和制定 BACnet 标准在照明控制系统中的应用，如一些新的智能照明控制构成以及系统各种数字接口等。

4. 消防与安防工作组（The LifeSafety and Security Working Group，LSS-WG）

研究和制定火灾消防与生命安全以及门禁安防等领域的应用，包括安防和消防系统中综合数据的表示方式，闭路电视监控中监控摄像机的聚焦控制以及这两个系统与其他子系统的集成。

5. MS/TP 工作组（The MS/TP Working Group，MS/TP-WG）

MS/TP（主从/令牌数据链路协议）维护、完善 BACnet 标准体系结构中的 MS/TP 通信链路。MS/TP 控制总线在现在基于 BACnet 标准的 BAS 中使用广泛，尽管速度不算太高，但可靠性与实

时性非常优良，是一种使用多年且优良的控制总线技术。

6. 网络安全工作组（Network Security Working Group，NS-WG）

该工作组负责研究和开发网络安全及相关的行规及标准。

7. 对象和服务工作组（The Objects and Services Working Group，OS-WG）

随着新技术突飞猛进地发展，对已定义的对象和服务类型进行维护和修订，并适时地增加新的对象和服务类型适应新的情况。

8. 测试和互操作工作组（Testing and Interoperability Working Group，TI-WG）

维护和完善 ANSI/ASHRAE 135—1995 标准，研究和解决 BACnet 标准中在互通信基础上的互操作问题。

9. 电梯工作组（The Elevator Working Group，EL-WG）

发展和扩充电梯监控系统与 BAS 之间的系统集成技术。

10. 无线网络工作组（Wireless Networking Working Group，WN-WG）

研究和开发 BACnet 标准利用无线网络技术构建性能更加优良及应用范围更加广泛的 BAS，如无线传感器网络、蓝牙网络、无线局域网、NFC（近场通信）网络等短距离无线网络、移动无线网络、卫星通信网络以及这些无线网络之间的互联互通技术。

11. XML 应用工作组（The XML Working Group，XML-WG）

由于 XML（eXtensible Markup Language，可扩展的标记语言）对于计算机软件、数据库管理和 B2B 通信具有的广泛适用性，以及这种标记语言出色的跨平台应用能力，将其应用在 BAS 中具有很大的优势，XML 应用工作组负责研究和开发 XML 技术在 BACnet 标准中的应用技术。

12. IT 工作组［The Information Technology（IT）Working Group，IT-WG］

研究开发未来的通信技术和信息技术及 BAS 的关系，以及楼宇信息化问题。

13. 灵巧网格工作组（The Smart Grid Working Group，SG-WG）

研究开发不同子系统之间的系统集成。

2.3 BACnet 标准的主要组成内容和概要

BACnet 标准的组成内容非常丰富，涵盖面恰当，内容融合了先进的计算机网络、通信技术、控制理论与控制工程、信息技术、暖通空调系统及技术中最先进部分的理论和工程实践成果。

2.3.1 BACnet 标准的主要组成内容

BACnet 标准中文版目录如下：

1. 目的
2. 范围
3. 术语定义
3.1 所采用的国际标准中的术语
3.2 本协议中定义的术语
3.3 本协议中使用的缩写和简称
4. BACnet 协议的体系结构
4.1 BACnet 简化的体系结构
4.2 BACnet 网络的拓扑结构
4.3 安全
5. 应用层

5. 1　应用层模型
5. 2　BACnet 报文的分段
5. 3　BACnet APDU 的传输
5. 4　应用层协议状态机
5. 5　应用层协议时序图
5. 6　应用层服务约定用法
6. 网络层
6. 1　网络层服务规范
6. 2　网络层 PDU 结构
6. 3　多个接收者的报文
6. 4　网络层协议报文
6. 5　网络层运行过程
6. 6　BACnet 路由器
6. 7　点到点半路由器
7. 数据链路/物理层：ISO 8802-3（“以太网”）局域网
7. 1　ISO 8802-2 逻辑链路控制的应用
7. 2　逻辑链路控制原语所需的参数
7. 3　MAC 原语所需的参数
7. 4　物理介质
8. 数据链路/物理层：ARCnet 局域网
8. 1　ISO 8802-2 逻辑链路控制的应用
8. 2　逻辑链路控制（LLC）原语所需的参数
8. 3　逻辑链路控制服务到 ARCnet MAC 层的映射
8. 4　MAC 原语所需的参数
8. 5　物理媒体
9. 数据链路/物理层：主-从/令牌传递（MS/TP）局域网
9. 1　服务规范
9. 2　物理层
9. 3　MS/TP 帧格式
9. 4　MS/TP 网络概述
9. 5　MS/TP 介质访问控制
9. 6　循环冗余校验（CRC）
9. 7　建立 MS/TP 局域网和其他 BACnet 局域网的接口
9. 8　对来自 MS/TP 的报文的 BACnet 用户处理的应答
9. 9　中继器
10. 数据链路/物理层：点到点（PTP）
10. 1　概述
10. 2　服务规范
10. 3　PTP 帧格式
10. 4　PTP 介质访问控制协议
11. 数据链路/物理层：LonTalk 局域网
11. 1　ISO 8802-2 逻辑链路控制（LLC）的应用

11.2　逻辑链路控制原语所需的参数
11.3　逻辑链路控制子层服务到 LonTalk 应用层的映射
11.4　应用层原语的参数
11.5　物理介质
12. 控制设备的对象模型
12.1　模拟输入对象类型（Analog Input Object Type）
12.2　模拟输出对象类型（Analog Output Object Type）
12.3　模拟值对象类型（Analog Value Object Type）
12.4　二进制输入对象类型（Binary Input Object Type）
12.5　二进制输出对象类型（Binary Output Object Type）
12.6　二进制值对象类型（Binary Value Object Type）
12.7　日期表对象类型（Calendar Object Type）
12.8　命令对象类型（Command Object Type）
12.9　设备对象类型（Device Object Type）
12.10　事件登记对象类型（Event Enrollment Object Type）
12.11　文件对象类型（File Object Type）
12.12　组对象类型（Group Object Type）
12.13　环对象类型（Loop Object Type）
12.14　多态输入对象类型（Multi-state Input Object Type）
12.15　多态输出对象类型（Multi-state Output Object Type）
12.16　通告类对象类型（Notification Class Object Type）
12.17　程序对象类型（Program Object Type）
12.18　时间表对象类型（Schedule Object Type）
13. 报警和事件服务
13.1　COV 报告
13.2　内部报告
13.3　算法改变报告
13.4　报警事件的发生和通告
13.5　确认报警服务
13.6　有证实 COV 通告服务
13.7　有证实事件通告服务
13.8　获得报警摘要服务
13.9　获得登记摘要服务
13.10　预订 COV 服务
13.11　无证实 COV 通告服务
13.12　无证实事件通告服务
14. 文件访问服务
14.1　基本读文件（AtomicReadFile）服务
14.2　基本写文件（AtomicWriteFile）服务
15. 对象访问服务
15.1　添加列表元素（AddListElement）服务
15.2　删除列表元素（RemoveListElement）服务

15.3　创建对象（CreateObject）服务
15.4　删除对象（DeleteObject）服务
15.5　读属性（ReadProperty）服务
15.6　条件读属性（ReadPropertyConditional）服务
15.7　读多个属性（ReadPropertyMultiple）服务
15.8　写属性（WriteProperty）服务
15.9　写多个属性（WritePropertyMultiple）服务
16. 远程设备管理服务
16.1　设备通信控制（DeviceCommunicationControl）服务
16.2　有证实专有传输（ConfirmedPrivateTransfer）服务
16.3　无证实专有传输（UnconfirmedPrivateTransfer）服务
16.4　重新初始化设备（ReinitializeDevice）服务
16.5　有证实文本报文（ConfirmedTextMessage）服务
16.6　无证实文本报文（UnconfirmedTextMessage）服务
16.7　时间同步（TimeSynchronization）服务
16.8　Who-Has 和 I-Have 服务
16.9　Who-Is 和 I-Am 服务
17. 虚拟终端服务
17.1　虚拟终端模型（Virtual Terminal Model）
17.2　VT 开启服务
17.3　VT 关闭服务
17.4　VT 数据服务
17.5　默认终端的指标
18. 错误、拒绝和中止代码
18.1　错误类：设备（Error Class：DEVICE）
18.2　错误类：对象（Error Class：OBJECT）
18.3　错误类：属性（Error Class：PROPERTY）
18.4　错误类：资源（Error Class：RESOURCES）
18.5　错误类：安全（Error Class：SECURITY）
18.6　错误类：服务（Error Class：SERVICES）
18.7　错误类：虚拟终端（Error Class：VT）
18.8　拒绝原因（Reject Reason）
18.9　中止原因（Abort Reason）
19. 命令优先级机制
19.1　优先级机制
19.2　应用优先级的分配（Application Priority Assignments）
19.3　活动最小值和非活动最小值
19.4　命令对象的优先级机制（Prioritization for Command Objects）
19.5　环对象的优先级机制（Prioritization for Loop Objects）
19.6　时间表对象的优先级机制（Prioritization for Schedule Objects）
20. BACnet 协议数据单元编码
20.1　BACnet APDU 的固定部分的编码

20.2　BACnet APDU 的可变部分的编码
21. 应用层协议数据单元的正式描述
21.1　APDU 定义
21.2　有证实服务的表述
21.3　有证实报警和事件服务
21.4　有证实文件访问服务
21.5　有证实对象访问服务
21.6　有证实远程设备管理服务
21.7　有证实虚拟终端服务
21.8　有证实安全服务
21.9　无证实请求的表述
21.10　无证实报警和事件服务
21.11　无证实远程设备管理服务
21.12　差错报文的表述
21.13　应用类型
21.14　基本类型
22. 一致性及其规范
22.1　BACnet 一致性类别
22.2　BACnet 功能组
22.3　BACnet 路由器
22.4　协议实现一致性声明
22.5　对于 BACnet 的一致性
23. 扩展 BACnet 容纳生产商专有信息
23.1　扩展枚举值
23.2　使用专有传输服务调用非标准服务
23.3　向标准对象添加专有属性
23.4　向 BACnet 中添加专有对象类型
23.5　在扩展 BACnet 中的限制
24. 网络安全
24.1　安全体系结构
24.2　鉴别机制
24.3　数据保密性机制
24.4　请求密钥服务
24.5　鉴别服务
25. 参考文献
附件 A　协议实现一致性声明（规范）
附件 B　规范 BACnet 设备的指南（资料）
附件 C　对象类型结构形式描述（资料）
附件 D　标准对象类型例程（资料）
D.1　模拟输入对象例程
D.2　模拟输出对象例程
D.3　模拟值对象例程

D. 4　二进制输入对象例程
D. 5　二进制输出对象例程
D. 6　二进制值对象例程
D. 7　日期表对象例程
D. 8　命令对象例程
D. 9　设备对象例程
D. 10　事件登记对象例程
D. 11　文件对象例程
D. 12　组对象例程
D. 13　环对象例程
D. 14　多态输入对象例程
D. 15　多态输出对象例程
D. 16　通告类对象例程
D. 17　程序对象例程
D. 18　时间表对象例程
附件 E　BACnet 应用服务的例程（资料）
E. 1　报警和事件服务
E. 2　文件访问服务
E. 3　对象访问服务
E. 4　远程设备管理服务
E. 5　虚拟终端服务
E. 6　安全服务
附件 F　APDU 编码例程（资料）
F. 1　报警和事件服务编码例程
F. 2　文件访问服务编码例程
F. 3　对象访问服务编码例程
F. 4　远程设备管理服务编码例程
F. 5　例 E. 5 编码——虚拟终端服务
F. 6　例 E. 6 编码——安全服务
附件 G　循环冗余校验（CRC）计算（资料）
G. 1　报头 CRC 的计算
G. 2　数据 CRC 的计算
附件 H　组合 BACnet 网络与 NON-BACnet 网络（规范）
H. 1　将 Non-BACnet 网络映射给 BACnet 路由器
H. 2　在单个物理设备中的多个“虚拟”BACnet 设备
H. 3　BACnet 与 IP 路由
H. 4　BACnet 与 IPX 路由
附件 I　具有活动最小值和非活动最小值的可命令属性
ASHRAE 关于开发工作对环境影响的政策声明
ANSI/ASHRAE 135-1995-BACnet 的附录 135a
附件 J　BACnet/IP 网络
J. 1　概要

J. 2　BACnet 虚拟链路层
J. 3　BACnet/IP 单播报文
J. 4　BACnet/IP 广播报文
J. 5　B/IP 向 B/IP 网络中添加外部 B/IP 设备
J. 6　在 B/IP 与非 B/IP BACnet 网络间进行路由
J. 7　在两个 B/IP BACnet 网络间进行路由
J. 8　BACnet/IP 中 IP 组播的使用
J. 9　因特网信息资源
ANSI/ASHRAE 标准 135—1995 附录 135b

2. 3. 2　BACnet 标准概要

下面简要介绍 BACnet 标准的各个部分，关于内容的深度分析和讨论放在后面的专门章节中。

1. “目的” 部分

说明了制定和颁布该标准的目的是：由于 BAS 的通信网络架构内容较为庞杂，对于提高系统的开放性造成了很大的障碍，因此为 BAS 的控制网络或称之为楼宇自控网络，定义一些能被广为接收的数据通信服务和协议，定义一些数据通信的服务和协议，这些服务和协议用于采暖、通风、空调和制冷控制设备（HVAC&R）的监控计算机设备或智能控制器中，并可以应用于其他 BAS 的计算机控制设备之中。为楼宇自控网络的数据通信制定一个统一的标准化语言，从而在今后进行 BAS 和核心设备及组件的设计、开发中，有规范的语言和标准。

BACnet 标准的内容并不是非常具体的规定条文细则，它是一个标准、规范，该标准很好地定义和界定了楼宇自控网络中智能化的监控设备或组件进行数据通信的主要原则、方法、实施的步骤。

2. “范围” 部分

BACnet 标准提供了一个完整的报文集合，用来在智能控制设备组件（嵌入微处理器或使用智能芯片的智能化控制装置或计算机）设备之间传送二进制编码、模拟量、文本数据和数字数据。

标准使用对象和属性描述的方法，即在无需了解设备的内部设计或配置细节，而能够识别和访问信息的方法。

3. “术语定义” 部分

这部分内容主要有：使用了其他相关国际标准中的术语；BACnet 标准中定义的术语；BACnet 标准中使用的缩写和简称。在 BACnet 标准中定义的术语当中，特别是定义了 BACnet 网络中的网桥、网关、路由器和半路由器、网络互联的概念、中继器、网段和网络，实际上这部分的术语定义从计算机网络和 Internet 技术中相同的术语引申而来。

4. “BACnet 协议的体系结构” 部分

借鉴了计算机网络的七层级结构 OSI 模型，提出了简化的四层级 BACnet 简化体系结构，BACnet 的简化体系结构在数据链路层和物理层支持 IEEE 802. 3 以太网、ARCnet 网络、MS/TP（主从/令牌传递）控制总线、RS-485 控制总线、RS-232 控制总线和 LonWorks 控制总线。同时，依据 BACnet 标准构建的网络支持多种网络传输介质：双绞线、光纤、同轴电缆、电力线；支持网络的拓扑结构可以灵活选择。

这部分内容还详细地定义描述了 BACnet 协议栈及数据组织方式；BACnet 报文和分段及传输的方式。

5. “应用层” 部分

在四层级的 BACnet 简化的体系结构中，应用层是最顶层，相当于计算机网络 OSI 模型的最顶层。建立应用层模型的目的是为了清楚地描述应用层与应用程序之间的交互（interaction）、应用层与协议栈中下面各层次的关系以及应用层与远程设备中应用层的对等交互。但需要说明的是，该模型并不是应用层的实现规范。

这一部分还定义了 BACnet 设备（BACnet Device），是指任何一种支持用 BACnet 协议进行数字通信的真实的或者虚拟的设备。每一个 BACnet 设备必须至少包含一个标准对象。每一个 BACnet 设备都由一个 NSAP（Network Service Access Point，网络服务执行点或网络服务接入点）惟一定位。在 NSAP 中，包含了一个网络编号和一个 MAC 地址。

这里的 NSAP 是用来实现开放式系统互联网络层寻址的两种分级地址之一。

这一部分内容还包括：BACnet 报文的分段；BACnet APDU 的传输、应用层协议状态机；应用层协议时序图等。报文是网络中交换与传输的数据单元。报文包含了将要发送的完整的数据信息。报文也是网络传输的单位，传输过程中会不断封装成分组、包、帧来传输，封装的方式就是添加一些信息段，那些就是报文头。APDU 是应用层的协议数据单元。

6. “网络层” 部分

BACnet 网络层的目的是提供一种方法，使用这种方法，不用考虑网络所使用的 BACnet 数据链路层使用的技术，可以将报文从一个 BACnet 网络传递到另一个 BACnet 网络。

网络层提供将报文直接传递到一个远程的 BACnet 设备、广播到一个远程 BACnet 网络或者广播到所有的 BACnet 网络中的所有 BACnet 设备的能力。一个 BACnet 设备被一个网络号码和一个 MAC 地址惟一确定。网络层的功能就是实现连接两个使用不同数据链路层协议的 BACnet 局域网。并使用“BACnet 路由器” 连接这些不同的 BACnet 局域网。

BACnet 网络层向应用层提供的服务是不确认的无连接形式的数据单元传送服务。与这种交互相关的原语是 N-UNITDATA 请求和指示。

定义了 BACnet 网络层协议数据单元 NPDU 的分组格式；NPDU 的协议版本号、网络层协议控制信息、特殊域的内容、网络层报文类型、生产商专有网络层报文等。

网络层部分还包括：多播报文和广播报文、网络层协议报文、网络层协议运行规程、BACnet 路由器和点到点半路由器。

其中 BACnet 路由器是连接两个或者多个 BACnet 网络形成 BACnet 互联网的设备；点到点半路由器则是将两个网络通过广域网（例如公共电话网络）进行连接的互联设备。点到点连接需要在两个半路由器之间建立连接从而形成一个完整的路由器。

7. “数据链路/物理层：ISO 8802-3（“以太网”）局域网” 部分

该部分主要介绍和定义了数据链路/物理层；直接引用 ISO 8802-3（“以太网”）局域网作为 BACnet 标准支持的楼宇自控网络之一；定义了逻辑链路控制原语及原语体系所需的参数；定义了 MAC 原语体系及所需的参数；定义了 PTP 网络和 MS/TP 网络的传输媒质，由于 Lon 网络、Ethernet、ARCnet 网络都是借鉴引入的现有标准及网络系统，网络传输介质依然按原有的方式使用。

8. “数据链路/物理层：ARCnet 局域网” 部分

这一部分则定义和详细地解析性叙述了 ISO 8802-2 逻辑链路控制的应用；逻辑链路控制（LLC）原语体系及所需的参数；ARCnet 局域网的 MAC 层得到从 BACnet 网络的逻辑链路控制服务映射；定义了 MAC 原语序列及所需的参数等。

9. “数据链路/物理层：主-从/令牌传递（MS/TP）局域网” 部分

这一部分解析性地定义了数据链路/物理层的服务规范；对 MS/TP 标准、MS/TP 数据帧的组

织方式即 MS/TP 帧格式都做了解析定义；对 MS/TP 网络的主-从/令牌传递介质访问控制模式、循环冗余校验（CRC）做了解析定义；对 MS/TP 网络的覆盖范围、数据传输速率的范围、使用 MS/TP 中继器扩展网络覆盖范围做了解析定义；还解析定义了：建立 MS/TP 局域网和其他 BACnet 局域网的接口；对来自 MS/TP 的报文的 BACnet 用户处理的应答等内容。

10. "数据链路/物理层：点到点（PTP）"部分

该部分主要解析定义了：数据链路/物理层的点到点（PTP）网络；服务规范；PTP 网络中相关的通信协议及数据单元的组织方式即 PTP 帧格式；点到点网络的传输媒质访问控制协议。

11. "数据链路/物理层：LonWorks 局域网"部分

该部分解析定义了 ISO 8802-2 逻辑链路控制的应用；LLC 控制原语序列及相关的参数；逻辑链路控制子层服务到 LonTalk 应用层的映射；应用层原语序列和相关的参数及物理介质。

12. 控制设备的对象模型

为了实现设备间的信息交换，BACnet 标准定义了一种标准的信息描述方式。为实现这种描述方式，采用面向对象的方法。

所有对象均由对象标识符属性所引用。每个 BACnet 设备的对象均有一个惟一的对象标识符属性值。将一个对象的对象标识符与具有系统全局惟一性质的 BACnet 设备对象标识符结合使用，就提供了一种在整个控制网络中引用每个对象的机制。

13. "报警和事件服务"部分

不同种类的报告；报警事件的发生和公告方式以及相应的报警服务；对各类情况对应的不同服务、通告服务做了解析定义。

14. 文件访问服务

该部分定义一组访问和操作在 BACnet 设备中的文件的服务。文件表示一个任意长度和意义的字节集合的网络可见形式。这只是一个抽象的概念，并不表示在服务器设备中用到了磁盘、磁带或其他的大容量存储设备。这些服务可以访问 BACnet 协议标准定义的特定文件，也可以访问生产商定义的文件。每一个能被文件访问服务访问的文件，在 BACnet 设备中都有一个对应的文件对象。这个文件对象标识特定的文件的名称。另外，文件对象还提供诸如文件总长度、文件创建日期和文件类型这样的访问"头信息"。文件访问服务给出了两种文件模型：连续字节流模型和编号记录的连续序列模型。

文件访问服务提供基本读和写操作。在本协议中，"基本的（atomic）"表示在读和写操作的执行期间，不允许有其他的基本读文件操作或者基本写文件操作作用在同一个文件上。

具有 BACnet 设备内部操作性质的服务如何同步的问题由生产商自行解决，标准没有作任何具体解析定义。

15. "对象访问服务"部分

在 BACnet 体系中，每一种 BACnet 设备都可以抽象成一个或几个标准对象的集合，对设备的访问就是对对象的访问。该部分解析定义了：添加列表元素的服务、删除列表元素的服务；创建对象的服务、删除对象的服务、读属性服务、条件读属性的服务、读多个属性的服务、写属性的服务等。

16. "远程设备管理服务"部分

在设备通信控制服务中，解析定义了设备通信控制服务原语结构、服务过程；在有证实专有传输服务中，解析定义了有证实专有传输服务结构、服务过程。无证实专有传输服务的内容有：无证实专有传输服务结构、Who-Has 服务过程、I-Have 服务结构、I-Have 服务过程；重新初始化设备服务、有证实文本报文服务、无证实文本报文服务和时间同步服务；Who-Has 和 I-Have 服务内容有：Who-Has 服务结构、Who-Has 服务过程、I-Have 服务结构和 I-Have 服务过程；

Who-Is 和 I-Am 服务内容有：Who-Is 服务结构、Who-Is 服务过程和 I-Am 服务过程等。

17. “虚拟终端服务”部分

一个客户端 BACnet 用户使用虚拟终端（VT）服务建立一个与另一个 BACnet 设备上的应用程序服务器的连接。建立这个连接的目的是为了实现数据的面向字符双工交换。VT 服务通常被用来使一个 BACnet 设备上的应用程序作为一个“终端模拟器”，与另一个 BACnet 设备上的“操作员接口”应用程序交互。这种类型的连接称之为 VT 会话（VT-session）。一旦建立了一个 VT 会话，客户端应用程序和服务器端应用程序都称之为 VT 用户（VT-user）。

在“虚拟终端服务”这一部分包括的内容如下：虚拟终端模型（包含：基本服务、VT 类型、活动 VT 会话、VT 开启、VT 关闭和 VT 数据的状态图、VT 会话同步、VT 会话标识符）；VT 开启服务（包含：结构、服务过程、VT 关闭服务、结构、服务过程）；VT 数据服务（包含：结构、服务过程）；默认终端的指标（包含：默认终端字符清单、控制功能）等。

18. “错误、拒绝和中止代码”部分

BACnet 协议中涉及的所有错误，按照“错误类”分类。在每一个错误类别中，进一步按照“错误代码”进行分类。这样分类，使得应用程序可能按照两个尺度，对错误采取不同的补救方式。“错误、拒绝和中止代码”部分包括的内容如下：

1）错误类-设备包含：设备忙、正在进行配置、运行问题；

2）错误类-对象包含：不支持动态创建、无指定类型的对象、不支持对象删除、对象标识符已存在、读访问拒绝、未知对象和不支持的对象类型等；

3）错误类-属性包含：不支持字符集 、选择准则不一致、无效数组索引、无效数据类型、读访问拒绝、未知属性、写访问拒绝和值超出阈值等；

4）错误类-资源包含：无空间创建对象、无空间添加列表元素和无空间写属性等；

5）错误类-安全包含：认证失败、不支持字符集、不兼容的安全等级、无效的操作员名字、密钥生成错误、密码错误、不支持安全性和超时等；

6）错误类-服务包含：不支持字符集、文件访问拒绝、参数不一致、无效的文件访问方法、无效的文件开始位置、无效的参数类型、无效的时间戳、属性非列表元素、缺少必要的参数和服务请求拒绝等；

7）错误类-虚拟终端包含：未知 VT 类别、未知 VT 会话、无可用的 VT 会话、VT 会话已经关闭和释放 VT 会话失败等；

8）拒绝原因包含：缓冲器溢出、参数不一致、无效参数类型、无效标志、缺少必要的参数、参数超出阈值、过多参数、未定义枚举和不支持的服务等；

9）中止原因包含：缓冲器溢出、在本状态下无效的 APDU、高优先级任务抢占、很不支持分段等。

19. “命令优先级机制”部分

在 BAS 中，一个对象可能被多个实体操作。例如，一个二进制输出对象的当前值可能被多个应用程序设置，诸如查询计量读数、优化启/停操作等。每一个这样的应用程序都有一个明确的功能需要执行。当有两个或者多个应用程序都要操作一个属性值而发生冲突时，就需要在这些应用程序之间进行协调。协调处理的目的是要保证被多个程序（或者非程序）实体操作的对象达到期望的状态。例如，一个启/停程序可能规定某个二进制输出对象应该为 ON，而查询计量读数的程序可能规定同一个二进制输出对象为 OFF。在这种情况下，OFF 应该具有优先权。操作者可以不顾查询计量读数程序，强行设置这个二进制输出对象为 ON，在这种情况下，ON 就具有优先权。

在 BACnet 协议中，采用一个优先级机制提供这种协调处理方法。这个优先级机制根据整个

系统要求，给命令实体分配不同的优先级级别。每个包含有一个可命令属性的对象负责按照命令的优先级顺序执行相应的操作。任何这样的机制都必须在复杂性和稳定性之间进行折中，本协议确定优先级机制应该是简单有效，并且可以应用到非常简单的 BACnet 设备中。

这部分内容如下：优先级机制（包含：可命令属性、优先级命令、释放命令、命令源标识符和命令改写等）；应用优先级的分配；活动最小值和非活动最小值；命令对象的优先级机制；环对象的优先级机制；时间表对象的优先级机制。

20. BACnet 协议数据单元编码

在 BACnet 中，使用应用层协议数据单元（APDU）传送包含在应用服务原语和相关参数中的信息。该部分内容如下：

1）BACnet APDU 的固定部分的编码包含：BACnet PDU 选择标记的编码、BACnet 有证实请求 PDU、BACnet 无证实请求 PDU、BACnet 简单确认 PDU、BACnet 复杂确认 PDU、BACnet 分段确认 PDU、BACnet 差错 PDU、BACnet 拒绝 PDU、BACnet 终止 PDU 等。

2）BACnet APDU 的可变部分的编码包含：BACnet 标记编码的一般规则、空值的编码、布尔值的编码、无符号整型数值的编码、有符号整型数值的编码、实数的编码、双准确度实数的编码、字节串值的编码、比特串值的编码、枚举值的编码、日期值的编码、时间值的编码、对象标识符值的编码、标记值的编码、序列值的编码、Sequence-Of 值的编码、选择值的编码、ANY 类型值的编码和标记规则总结等。

21. “应用层协议数据单元的正式描述”部分

这部分内容通过 ASN. 1 模块定义所有的 BACnet APDU 及其数据类型。在 13 节至 17 节中有许多被定义为条件的或者可选的服务参数，这些参数在 ASN. 1 的表述中都标注为 OPTINAL，说明这些参数可以在 PDU 中存在，也可以不在 PDU 中存在。在 ASN. l 表述中只使用 OPTIONAL 标注，不改变在服务规范中对条件的参数的要求。

22. “一致性及其规范”部分

BACnet 定义了一套具有广泛适应性的对象类型和应用服务，其目的是要满足在分布式的、具有层次结构的 BAS 中各个层次的控制设备对数据通信的要求。这里需要说明的是，并不要求 BAS 中所有设备都必须支持 BACnet 的所有功能才能实现 BACnet 数据通信。本部分定义了一套为了实现 BACnet 数据通信功能，设备必须满足的要求。本部分定义了 6 个一致性类别和 13 个“功能组”。这 6 个一致性类别编号为 1 ~ 6，具有分级结构，每一个类别的要求都包括了编号数小于该类别的所有类别的要求。功能组是若干 BACnet 标准对象类型和应用服务的集合，它们一起工作，可以满足一个单项的楼宇自动控制功能的通信要求。

1）BACnet 一致性类别包含：一致性类别 1 ~ 6；

2）BACnet 功能组包含：时钟功能组、手提操作设备（HHWS）功能组、个人计算机工作站（PCWS）功能组、事件起始（Event Initiation）功能组、事件响应（Event Resonse）功能组、COV 事件起始功能组、COV 事件响应功能组、文件功能组、重新初始化功能组、虚拟操作员接口功能组、虚拟终端功能组、设备通信功能组、时间主站功能组；

3）BACnet 路由器；

4）协议实现一致性声明；

5）对于 BACnet 的一致性包含：最小的一致性要求、PICS、一致性测试、数据链路层和物理层、关于与非标准数据链路层的兼容问题。

23. 扩展 BACnet 容纳生产商专有信息

BACnet 协议的目的是为楼宇自动控制设备交换信息提供一种机制。为了实现互操作性，BACnet 定义了一组标准的数据结构，称之为对象。标准对象中包含的信息是在大多数楼宇系统

中普遍使用的信息，同时 BACnet 也允许在设备中交换非标准化的信息和扩展 BACnet 容纳非标准信息交换的方式。

1）扩展枚举值；

2）使用专有传输服务调用非标准服务；

3）向标准对象添加专有属性；

4）向 BACnet 中添加专有对象类型包含：专有对象类型枚举值、专有属性的数据类型、在专有对象类型中要求的属性；

5）在扩展 BACnet 中的限制。

24. “网络安全”部分

这一部分内容定义了一个有限的安全体系结构。在 BACnet 中，网络安全是可选项。本协议的安全体系提供对等实体鉴别（authentication）、数据来源鉴别、操作员身份鉴别和数据保密性与完整性方面的安全机制，不提供诸如访问控制和非否定的通信安全机制，如果系统中需要这样的安全机制，可以使用专有的方法将它们加入到 BACnet 中。

1）安全体系结构包含：概述、私有加密密钥、会话加密密钥、加密算法；

2）鉴别机制包含：获得会话密钥的过程、对等实体鉴别机制、报文执行鉴别、报文起始鉴别、操作员身份鉴别；

3）数据保密性机制包含：请求一个加密会话、结束一个加密会话；

4）请求密钥服务包含：结构、服务过程；

5）鉴别服务包含：结构、服务过程。

2.4　国际和国内推广 BACnet 标准的组织

2.4.1　ASHRAE SSPC 135 委员会

BACnet 标准一直有 ASHRAE 的 SSPC-135 委员会管理，一直在持续完善中。这个开放式标准的目的是为了使不同生产商提供的控制设备能够互操作，也使业主不再依赖特定的私有技术。BACnet 针对标准对象建模，其中包含一组对象的标准化设备。每种对象包含一组定义的标准属性。每个属性的值确定了每个对象的惟一性，比如模拟输入对象的现时值。设备可以给其他设备提供服务，BACnet 设备根据它们提供的服务方式来分类，BACnet 设备从一个简单的智能传感器到复杂的楼宇控制器。

通过其官方网站提供关于 BACnet 标准及技术的最新信息，BACnet 标准不仅是美国的国家标准，也是欧共体的标准，同时也是世界上超过 30 多个国家的国家标准，同时也是 ISO 国际标准。

ASHRAE SSPC 135 委员会的官方网站：http://www.bacnet.org。

2.4.2　BACnet International

该组织旨在通过兼容性测试、教育性项目以及各种推广活动等形式来推动 BACnet 在楼宇自动化和控制系统中的成功应用。该组织同时还能配合、协助其他一些不能进行商业活动的 BACnet 团体开展业务。

网站：http://bacnetinternational.com。

2.4.3　BACnet Interest Group Europe（BIG-EU）

该协会在欧洲楼宇自动化和安全工程行业推广 BACnet 通信协议 ISO 16484-5 的应用。该协会

由 18 个楼宇自动化公司于 1998 年创立，如今已拥有 50 多位来自比利时、德国、英国、芬兰、法国、意大利、加拿大、荷兰、澳大利亚、瑞士和美国的会员。在 BACnet 标准的全球推广与发展中，BIG-EU 组织是欧洲地区最主要的组织之一。

网站：http://www.bacnetforum.org。

2.4.4　Caba

该协会是一个非盈利性行业协会，在北美地区推广住宅和楼宇自动化的先进技术，鼓励开发，推行楼宇系统集成和自动化。

网站：http://www.caba.org。

2.4.5　IPC

该协会是在美国成立的贸易协会，为其多达 2000 多个会员单位提供服务，旨在提高行业竞争力和业务增长。IPC 是惟一一家能把设计师、电路板生产厂商、装配厂商、元器件供应商和原始设备制造厂商集结起来的电子行业的专门组织。

2.4.6　PCI-SIG

该组织创立于 1992 年，是专门从事开发和管理 PCI 标准的工业组织。该组织拥有 900 多个会员单位，致力于不断更新 PCI 标准以满足行业要求。PCI-SIG 的会员通过兼容性测试、技术支持、研讨会和行业会议等各种活动来增强竞争力，提高产品质量。

请访问网站，获取更多信息。

2.4.7　ARCnet Trade Association（ATA）

该协会致力于在不同的应用中推广嵌入式网络技术 ARCnet 的使用。ATA 是 ANSI（美国国家标准学会）认可的标准研发协会，并指定该协会对 ANSI/ATA 878.1—1999 标准进行维护更新。

网站：http://www.answers.com。

2.4.8　BMA-BACnet 制造商协会

非盈利性学术组织，致力于推进 BAS 的开放，通过互操作性试验、教学媒体和奖励活动，促进 BACnet 在 BAS 中的成功应用。

2.4.9　国内的相关组织

1. BACnet 中国协会筹备委员会成立

BACnet 北京论坛于 2009 年 10 月 20 日在北京举办，这是 BACnet 业界第一次在我国开展的大型国际活动，吸引了国内外智能建筑自控领域各大公司的极大兴趣。在论坛的准备期间有很多公司提出建议，希望尽快建立 BACnet 中国协会。为此由德国 MarDirect 公司发起，由参加此次论坛的主要厂商参加，成立了 BACnet 中国协会筹备委员会。BACnet 中国协会的英文名称为 BIG-CN（BACnet Interest Group China），网址：www.bacnetchina.org。BACnet 技术一问世，就以其性能高效、完全开放的特点以及良好的扩展性和连通性著称，获得迅速的推广和应用。2003 年被 ISO 组织批准为国际标准（ISO 16484-5），引起国际智能建筑领域空前广泛的关注，成为全球推动开放式集成系统的主要力量。在此期间，全球各地建立起了许多应用和推广 BACnet 技术的组织，包括 BACnet 国际协会 BI（BACnet International）、欧洲协会 BIG-EU（BACnet Interest Group Europe）、中东协会 BIG-ME、澳大利亚协会 BIG-AA 和俄罗斯协会 BIG-RU 等。

2. BACnet 中国利益集团（BIG-CN）

BACnet 中国利益集团（BIG-CN）于 2011 年 4 月 28 日成立。第一次在 2011 年 6 月 9 日～12 日举办的广州建筑电气技术展览会上推出可持续发展的楼宇自动化多厂商解决方案。“智能建筑管理系统中的集成控制器、传感器和执行器都有益于业主和投资商。”此次联合展台经理布鲁诺·克鲁博特说道，“开放的 BACnet 通信标准提供了成本与能源效率的基准。

BACnet 主要楼宇自动化制造商的承诺展示了我国建筑与装修市场的新型高效能源管理和节约解决方案的机会。

2.4.10　国内近两年来开展关于 BACnet 标准技术交流的情况

1. 国内关于 BACnet 标准技术交流的概况

我国新建的许多新型办公楼、商务写字楼、综合功能建筑一般都装备了建筑智能化系统，因此我国的建筑智能化系统的市场发展迅速，已成为全球最大的市场，这给国际智能建筑自控产业提供了巨大的商机，然而遗憾的是我国自己的建筑物自控产业却没能形成具有竞争力的开发和生产能力。因此促进 BACnet 技术的国际交流，介绍和引入国际最先进的智能建筑自控技术和产品，同时推进我国建筑物自控产业的发展和壮大就是业界面临的共同任务。

我国是投票赞成 BACnet 成为国际标准的国家，但是至今还不是我国的国家标准。西方发达国家以及韩国、日本都早已将 BACnet 标准转换为各自的国家标准，在这点上，反映了我国在该领域自主开发和生产能力居于落后水平。

国内近两年来也开展了关于 BACnet 标准技术交流的一些国际交流。继 2009 年 10 月成功举办的“2009 BACnet 北京论坛”之后，BACnet 在国内业界都引起广泛的关注。2010 年 10 月 20 日上海世博会期间，德国 Mardrikt 公司和机械工业仪器仪表综合技术经济研究所技术推广中心合作，联合承办了“上海 BACnet-智能绿色建筑高峰论坛”，全国工业过程测量和控制标准化技术委员会（SAC/TC124）秘书处、BACnet 国际组织（BI）、BACnet 欧洲组织（BIG-EU）和 BACnet 中国组织（CN）共同参与了主办。

“上海 BACnet-智能绿色建筑高峰论坛”主题是“绿色建筑的高效能系统集成”。来自美国、欧洲、亚洲 BACnet 组织成员的专家分别就 BACnet 技术、BACnet ISO 16484-5 标准、BACnet 应用系统的结构、解决方案以及 BACnet 技术的最新进展和发展趋势进行了演讲，部分制造商、供应商介绍了先进的 BACnet 技术产品。

会议还就建立 BACnet 中国组织秘书处机构和 BACnet 技术推广等相关议题进行了交流和探讨。

2. 近年关于 BACnet 技术发展与推广的活动情况

1）BACnet 第一个论坛于 2009 年 10 月 20 日在北京举行。

2）BACnet 上海论坛于 2010 年世博会期间在上海举行。

3）BACnet 香港论坛于 2011 年 3 月在我国香港特别行政区举行。

4）西门子（Siemens）楼宇系统成功应用于北京 2008 奥运游泳中心“水立方”工程。

5）瑞保（Reliable Controls）自控公司“绿色家园”项目赢得了国际上的广泛关注（BACnet Solution from reliable controls）。

6）Delta 控制公司 BACnet 协议集成应用于北京龙冠置业大厦冷水系统群控（Cool water system with BACnet protocol from Delta Controls used in the Long Guan Building Beijing）。

7）特默克（Thermokon）传感技术有限公司 SRC65-BACnet 产品实现楼宇系统无线和有线的无缝对接（Thermokon produced a new product-SRC65-BACnet）。

8）索特（Sauter）自控系统公司应用 BACnet 技术为金融街 F10 大唐集团金成大厦提供了最

优化的楼宇自控方案（Sauter supplies the optimal BAS solution for F10 Jin Cheng Building Beijing using BACnet technology）。

9）江森自控公司（Johnson Controls）应用BACnet技术实现全部投资组合的能源管理（Johnson Controls Case Study-Portfolio-wide energy management leveraging BACnet）。

10）科特贝德公司（Kieback&Peter）楼控系统赢得空客A320系列飞机天津总装线项目（Kieback&Peter BAS won with BACnet technology the project of the montage hall of Air bus 320 Tianjin）。

11）Delta控制公司BACnet应用项目获建设部智能建筑优质工程奖（Delta Controls won China's Ministry of Construction Award-Excellent Intelligent Building 2005）。

12）科特贝德（Kieback&Peter）公司全新的Native BACnet控制器成功应用于奥运会重点工程（Beijing Olympic centre uses Native BACnet BMR410 automation from Kieback&Peter）。

13）ABB公司的变频器应用BACnet实现节能25%（Birmingham Hippodrome saves 25% of HVAC energy with ABB drives）。

2.5 BACnet 认证和 BTL 测试

1. BACnet 认证和 BTL 测试

BTL-BACnet测试实验室负责检验产品是否符合BTL基于ASHRAE标准的要求，符合BTL要求的产品才能进入BTL列表，并向行业发布符合BACnet标准的产品。BACnet的一个相关标准——“ASHRAE 135.1P BACnet 一致性测试方法”就是由该机构授权。

这里还需注意，如果要进行BACnet产品开发，尤其是要将BACnet产品进行国际化拓展时，一般是要进行BACnet认证BTL测试的。

为了对BTL测试计划制定者和测试者进行指导，专门编写了一份“BLT testing Guide”文档。

BTL测试计划制定者确定待测设备的功能，准备待测设备的配置，决定进行哪些项目的测试以及针对这些测试项目选择适当的参数。测试计划使用者为使用BTL测试包为待测设备创建一个自定义的测试包，这个测试包将由测试者使用。测试计划制定者需要对IUT的功能有详尽的理解并且知道如何使待测设备展现所用标称的功能。

2. 测试过程

测试过程被划分为两个阶段：测试计划制定阶段和测试实施阶段。测试计划制定阶段产生了针对待测设备的BTL测试计划；测试实施阶段使用制定的测试计划与待测设备进行测试。

3. 行业协会组织

BACnet制造商协会（BMA）是非盈利性协会组织，有不同专业的BACnet产品制造商以及参与建筑智能化系统设计和实施的成员组成。BMA通过互操作试验、教学媒体和奖励活动来促进在建筑智能化系统中广泛使用BACnet产品。

4. BTL 认证机构

BACnet国际（当前的BTL认证机构）。BMA更名为BI（BACnet International），BI与BMA的区别在于：会员不仅由产品供应商组成，建筑商、业主和工程顾问公司等都参与其中。

5. BACnet BTL 测试实验室

BACnet BTL测试实验室有：

（1）美国与全球 BACnet BTL 测试实验室

印度 BACnet BTL 测试实验室（成立于 2006 年），该实验室位于印度孟买，由 softDEL 公司执行，从 2006 年开始接收复合 BACnet 标准的楼宇自动化产品的 BTL 测试。

（2）欧洲 BACnet BTL 测试实验室

德国 BTL 测试实验室，位于德国斯图加特，由 WSPLab 公司执行。

第 3 章　BACnet 协议的体系结构和应用层

BACnet 标准是一个关于楼宇自控网络的标准，楼宇自控网络与计算机局域网、许多现场总线网络或控制总线网络一样，都是进行通信的数据网络。在计算机网络发展的早期，为了实现异构网络的互联互通和实现通畅的数据通信，将所有不同种类的计算机网络都抽象地按照 7 个层级结构来建立一个普适的模型，在此基础上解决异构网络的互联互通以及彼此间的数据通信。为此国际标准化组织定义开放系统互联参考模型（OSI）（ISO 7498）。BACnet 标准以计算机网络开放系统互联参考模型为基础，定义了 BACnet 协议的体系结构。

3.1　OSI 七层参考模型和 BACnet 简化体系结构的提出

3.1.1　OSI 七层参考模型及各层级数据的组织形式

1. OSI 七层参考模型

OSI 参考模型采用分层的结构化技术，共分为 7 层，从低到高依次为：物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层，如图 3-1 所示。

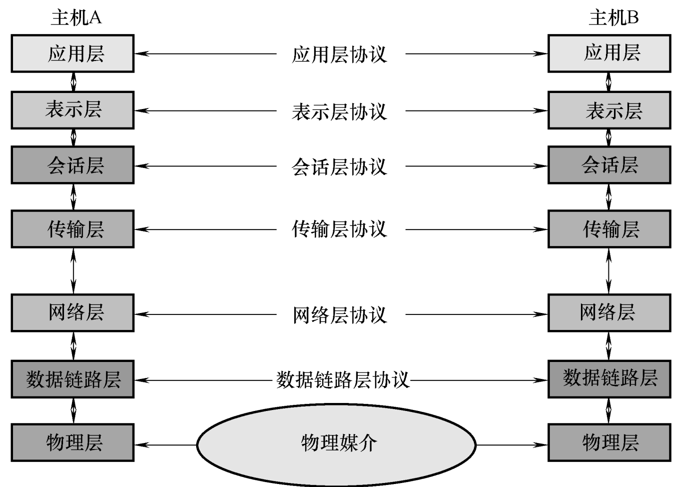


图 3-1　OSI 七层参考模型

OSI 参考模型的每一层都有特定的功能，以保证数据报能从源站点传输到目的站点。OSI 参考模型各层的功能情况如下：

（1）物理层（Physical Layer）

物理层位于 OSI 参考模型的最底层，它直接面向原始数据比特流的传输。为了实现数据原始比特流的物理传输，物理层必须解决好包括传输介质、信道类型、数据与信号之间的转换、信号传输中的衰减和噪声等在内的一系列问题。另外，物理层标准要给出关于物理接口的机械、电气功能和规程特性，以便于不同的制造厂家既能够根据公认的标准各自独立地制造设备，又能使各个厂家的产品能够相互兼容。

（2）数据链路层（Data Link Layer）

数据链路层涉及相邻节点之间的可靠数据传输，数据链路层通过加强物理层传输原始数据比特流的功能，使之对网络层表现为一条无错线路。为了能够实现相邻节点之间无差错的数据传输，数据链路层在数据传输过程中提供了确认、差错控制和流量控制等机制。

（3）网络层（Network Layer）

网络中的两台计算机进行通信时，中间可能要经过许多中间节点甚至不同的通信子网。网络层的任务就是在通信子网中选择一条合适的路径，使发送端传输层所传下来的数据能够通过所选择的路径到达目的端。

为了实现路径选择，网络层必须使用寻址方案来确定存在哪些网络以及设备在这些网络中所处的位置，不同网络层协议所采用的寻址方案是不同的。在确定了目标节点的位置后，网络层还要负责引导数据报正确地通过网络，找到通过网络的最优路径，即路由选择。网络层还要解决异构网络互联问题。

（4）传输层（Transport Layer）

传输层是 OSI 参考模型中惟一负责端到端节点间数据传输和控制功能的层。传输层是 OSI 参考模型中承上启下的层，它下面的 3 层主要面向网络通信，以确保信息被准确有效地传输；它上面的 3 层则面向用户主机，为用户提供各种服务。

传输层通过弥补网络层服务质量的不足，为会话层提供端到端的可靠数据传输服务。它为会话层屏蔽了传输层以下的数据通信的细节，使会话层不会受到下 3 层技术变化的影响。但同时，它又依靠下面的 3 个层次控制实际的网络通信操作，来完成数据从源到目标的传输。传输层为了向会话层提供可靠的端到端传输服务，也使用了差错控制和流量控制等机制。

（5）会话层（Session Layer）

会话层的主要功能是在两个节点间建立、维护和释放面向用户的连接，并对会话进行管理和控制，保证会话数据可靠传输。

会话连接和传输连接之间有 3 种关系：一对一关系，即一个会话连接对应一个传输连接；一对多关系，一个会话连接对应多个传输连接；多对一关系，多个会话连接对应一个传输关系。会话过程中，会话层需要决定到底使用全双工通信还是半双工通信。如果采用全双工通信，则会话层在对话管理中要做的工作就很少；如果采用半双工通信，会话层则通过一个数据令牌来协调会话，保证每次只有一个用户能够传输数据。

（6）表示层（Presentation Layer）

OSI 模型中，表示层以下的各层主要负责数据在网络中传输时不要出错。但数据的传输没有出错，并不代表数据所表示的信息不会出错。表示层专门负责有关网络中计算机信息表示方式的问题。表示层负责在不同的数据格式之间进行转换操作，以实现不同计算机系统间的信息交换。表示层还负责数据的加密，以在数据的传输过程对其进行保护。数据在发送端被加密，在接收端解密。使用加密密钥来对数据进行加密和解密。表示层还负责文件的压缩，通过算法来压缩文件的大小，降低传输费用。

（7）应用层（Application Layer）

应用层是 OSI 参考模型中最靠近用户的一层，负责为用户的应用程序提供网络服务。与 OSI 参考模型其他层不同的是，它不为任何其他 OSI 层提供服务，而只是为 OSI 模型以外的应用程序提供服务，如电子表格程序和文字处理程序。包括为相互通信的应用程序或进程之间建立连接、进行同步，建立关于错误纠正和控制数据完整性过程的协商等。

2. OSI 的层间通信

为了与其他计算机上的同等层进行通信，每一层都定义了一个包头，而且有时还定义了包尾。包头和包尾是附加的数据位，由发送方计算机的软件或硬件生成，放在由上层传给相邻的下

层的数据前面或后面。这一层与其他计算机上同等层进行通信所需要的信息就在这些包头或包尾中被编码。接收方计算机的对等层软件或硬件解释由发送方计算机对应层所生成的包头或包尾编码并进行进一步的处理。

每一层使用本层的协议与其他系统的对等层相互通信。每一层的协议与对等层之间交换的信息称为协议数据单元（Protocol Data Unit，PDU）。

通常将数据放置在每一层的包头后面（及包尾之前）的过程称为封装。当每一层生成了包头时，将由相邻上一层传递来的数据放到该包头的后面，这样就封装了高一层的数据。对数据链路层（第 2 层）协议而言，第 3 层的包头和数据将放到第 2 层的包头和包尾之间。物理层并不使用封装，因为它不使用包头和包尾。

当远端的信宿站点顺序接收到一个比特序列时，把它们上传给数据链路层以组装为数据帧。当数据链路层接收到该帧时，它顺序执行解封装过程：读取物理地址和由直接相连的对等数据链路层所提供的控制信息；从该帧剥离该控制信息并由此创建一个数据报；遵照在帧的控制部分中出现的内容而把数据报向上传输到相邻层。

3. OSI 模型各层级数据的组织形式

（1）七层级模型不同层级中的数据组织形式

数据链路层中数据块的组织形式是数据帧。使用控制字符进行帧的定界，如图 3-2 所示。

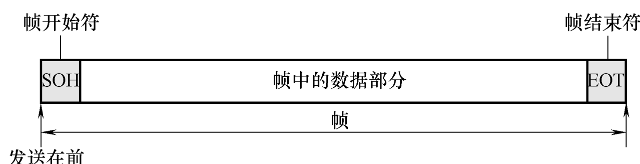


图 3-2　控制字符进行帧的定界

将一个数据块封装成帧，就是在这个数据块的前后分别加上首部和尾部，确定帧的边界。

网络层的数据块组织形式是 IP 数据报。一个 IP 数据报由首部和数据两部分组成。首部的前一部分是固定长度，共 20B，是所有 IP 数据报必须具有的。在首部的固定部分后面是一些可选字段，其长度是可变的。

网络层的 IP 数据报交付给下面的数据链路层后，IP 数据报作为帧的数据部分，加上帧首部和帧尾部，将数据块组装成帧。

网络层的 IP 数据报和数据链路层的帧之间的关系如图 3-3 所示。

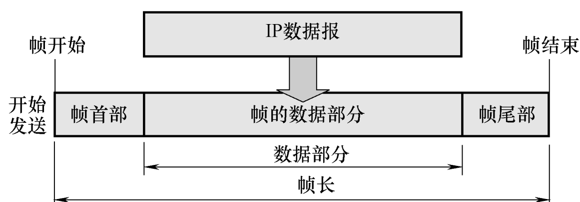


图 3-3　网络层的 IP 数据报和数据链路层帧的关系

传输层有两个重要的通信协议：一个是提供面向连接通信的 TCP（传输控制协议）；还有一个是不提供面向连接通信的 UDP（用户数据报协议）。传输层对应的有 UDP 数据报和 TCP 数据报。应用层报文、UDP 数据报和 IP 数据报之间的关系如图 3-4 所示。UDP 数据报由传输层向下交付给网络层后，UDP 数据报成为 IP 数据报的“数据”部分，加上 IP 首部组成 IP 数据报。

（2）以太网中的 IP 地址和 MAC 地址

IP 地址写在 IP 数据报的首部里，如图 3-5 所示。

IP 地址和 MAC 地址使用的区别是：在 OSI 七层级模型中，网络层及以上各层使用 IP 地址，在数据链路层和物理层使用 MAC 地址。

数据从应用层到传输层，数据的报头是 TCP 的报头，向下迁移到网络层后，数据在之前的

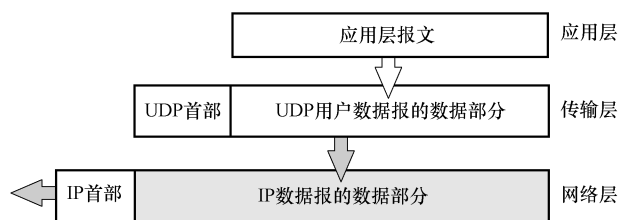


图 3-4　应用层报文、UDP 数据报和 IP 数据报的关系

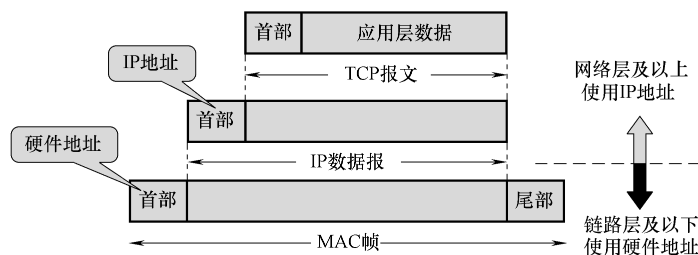


图 3-5　IP 地址写在 IP 数据报首部

TCP 报头前再加上 IP 报头，IP 报头中有目标 IP 地址和源 IP 地址。

以太网的 MAC 帧格式如图 3-6 所示。

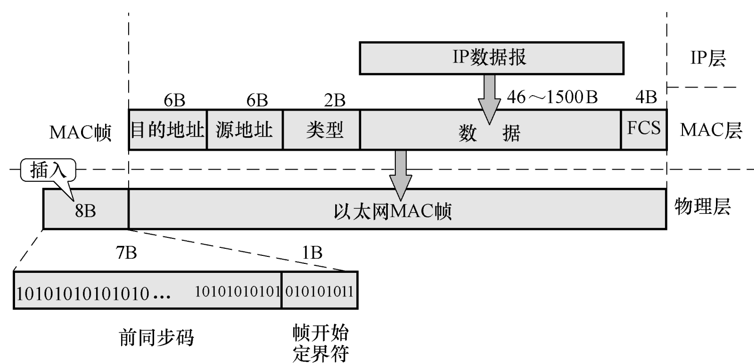


图 3-6　以太网的 MAC 帧格式

3.1.2　BACnet 简化体系结构的提出

网络中的两个实体进行通信时，对于某个层级来讲，使用下面各层所提供的服务，同时也向它上面的各层提供服务。每一层都可以认为是无需关注其内部构造和原理，而只关心它的功能及如何使用这些功能的一个黑盒子，黑盒子的上面和下面都具有经过严格定义的接口。一个应用程序通过与 OSI 应用层的相连，实现与另一个远程应用程序的通信。我们知道，网络中的站点间通信实质是应用程序之间的通信，这种过程就是计算机网络 OSI 模型的工作过程，BACnet 标准完全使用了这种分层的思想，同时结合建筑楼宇自控网络的特点给出了 BACnet 简化体系结构。

计算机网络中进行通信的不同节点之间可能相距很近，也可能有很远的物理空间距离，传送的报文要通过一系列中间节点才能到达信宿节点。而这些中间节点一般情况下需要具备实现路由选择的功能和一定的数据包解析功能，还要有复杂的同步和差错恢复功能。

实现 OSI 模型协议所需的费用较高，意思是实现 OSI 模型协议所需的硬件成本和软件成本较高，但对于绝大部分 BAS 的控制网络来讲，并不需要实现 OSI 模型的所有内容。结合楼宇自控

网络和 BAS 的特点，仅选择 OSI 模型中需要的层次，形成一个简化的模型，作为楼宇自控网络的协议体系结构，减少通信过程中传输和处理数据报文的长度，降低通信过程中进行传输和处理的开销，这就是提出 BACnet 简化体系结构的基本思想。

简化的体系结构降低了楼宇自控产品的生产成本，同时微处理器的大批量生产、局域网技术的发展，也为过程控制及自动化工业的发展起到了推动作用。另一方面，可以充分利用现有的、易用的、应用广泛的局域网技术，如以太网、ARCnet 和 LonWorks 网络。这样不但可以降低成本，而且也有利于提高性能，便于进行系统集成。

3.2　BACnet 简化的体系结构和支持的局域网

3.2.1　BACnet 简化的体系结构和各层功能

1. BACnet 简化的体系结构

BACnet 建立在包含 4 个层次的简化分层体系结构上，这 4 层相当于 OSI 模型中的物理层、数据链路层、网络层和应用层，如图 3-7 所示。BACnet 标准定义了自己的应用层和简单的网络层，对于其数据链路层和物理层，提供了 5 种选择方案。

<table>
<tr><th colspan="5">BACnet 的协议层次</th><th>对应的 OSI 层次</th></tr>
<tr><td colspan="5">BACnet应用层</td><td>应用层</td></tr>
<tr><td colspan="5">BACnet网络层</td><td>网络层</td></tr>
<tr><td colspan="2">ISO 8802-2 (IEEE 802.2)类型1</td><td>MS/TP (主从/令牌传递)</td><td>PTP (点到点协议)</td><td rowspan="2">LonTalk</td><td>数据链路层</td></tr>
<tr><td>ISO 8802-3 (IEEE 802.3)</td><td>ARCnet</td><td>EIA-485 (RS-485)</td><td>ELA-232 (RS-232)</td><td>物理层</td></tr>
</table>

图 3-7　BACnet 简化的体系结构

第一种选择是 ISO 8802-2 类型 1 定义的逻辑链路控制（LLC）协议，加上 ISO 8802-3 介质访问控制（MAC）协议和物理层协议。ISO 8802-2 类型 1 提供了无连接（Connectionless）不确认（Unacknowledged）的服务，ISO 8802-3 则是著名的以太网协议的国际标准。第二种选择是 ISO 8802-2 类型 1 定义的逻辑链路控制协议，加上 ARCnet（美国国家技术标准 ATA/ANSI 878.1：令牌总线局域网）。第三种选择是主从/令牌传递（MS/TP）协议加上 EIA-485 协议。MS/TP 协议是专门针对楼宇自动控制设备设计的，同 ISO 8802-2 类型 1 一样，它通过控制 EIA-485 的物理层，向网络层提供接口。第四种选择是点对点（PTP）协议加上 EIA-232 协议，为拨号串行异步通信提供了通信机制。第五种选择是 LonTalk 协议。

拓扑结构上，支持星形和总线型拓扑。在物理传输介质上，支持双绞线、同轴电缆、光缆信道组网。

2. BACnet 简化体系结构的各层功能

物理层提供了连接设备和传输数据比特流的方式，BACnet 网络中，物理层是必不可少的。

数据链路层负责将数据组织成帧（frame）或分组（packet），管理通信介质的访问、寻址，以及完成一些差错校正和流量控制的任务，这些都是 BACnet 协议所需要的，因此数据链路层也是必不可少的。

BACnet 简化体系结构中的网络层功能包括：将全局地址解析为局部地址、在一个或多个网络中进行报文的路由、协调异构网络的差异（如不同网络所允许的最大报文长度）、序列控制、

流量控制、差错控制以及信道复用。由于 BACnet 网络的拓扑特点，在各个设备之间只存在一条逻辑通路，这样便不需要最优路由的算法。其次，BACnet 网络是由中继器或者网桥互联起来的一个或者多个网段所组成的网络，它具有单一的局部地址空间。在这样一种单一网络中，许多 OSI 网络层的功能也变得多余，或者与数据链路层相重复。但是在 BACnet 网络系统中，网络层又是必不可少的。例如，在一个 BACnet 互联网中，当两个或者多个网络使用了不同的 MAC 层时，便需要区别局部地址和全局地址，这样才能将报文路由到正确的网络上去。在 BACnet 协议中，通过定义了一个包含必要的寻径和控制信息的网络层头部，来完成这种简化了的网络层功能。

传输层主要负责提供可靠的端到端的报文传输、报文分段、序列控制、流量控制，以及差错校正。传输层的许多功能与数据链路层相似，只是在作用范围上有所不同。传输层提供的是端到端的服务，而数据链路层则提供的是单一网络上点到点的服务。由于 BACnet 支持多种网络的配置，因此协议必须提供传输层端到端的服务。而可靠的端到端传输和差错校正功能，在 BACnet 协议中由 BACnet 的应用层利用报文超时重传方式来完成。其次，考虑到缓冲区和处理器资源的管理，报文分段和端到端的流量控制也是必要的。这是因为即使一个简单的 BACnet 请求，都可能会导致大量的信息回传。同样，这些功能也是由 BACnet 的应用层完成的。最后，为了实现报文的正确重组，序列控制也是必需的。这也是由 BACnet 的应用层中的分段过程实现的。总的来说，由于 BACnet 是建立在无连接的通信模型基础上的，因此所需的服务大大减少，并且可以被高层来实现，这样便省去了一个单独传输层所会增加的通信开销。在 BACnet 协议中，不设单独的传输层，所需的功能由应用层实现。

会话层的功能是在通信双方之间建立和管理长时间对话，其中的一个重要功能是建立同步标志点，用来在发生差错时回复到前一个标志点，以避免对话重新开始。但是在一个 BACnet 网络中，绝大部分的通信都是很简短的，比如读写一个值或者一些值，通知（notify）某个设备有某个警报或事件（event）发生，或者更改某个设定值。当然长时间的信息交换偶然也会发生，比如上传或下载某个设备参数。由于绝大部分事务处理都是简短的，会话层的服务极少用到，再考虑到设置单独的会话层所带来的开销，所以 BACnet 标准中也不包括单独的会话层。

表示层为通信双方提供了屏蔽下层传送语法的服务。这种传送语法是用来将应用层中抽象的用户数据视图，变成适合下层传输的字节序列。但当只存在一种传送语法时，表示层的功能便减少到对应用程序的数据进行编码。由于在 BACnet 应用层中定义了一个固定的编码方案，因此一个独立的表示层也变得不再需要。

协议的应用层为应用程序提供了完成各自功能所需的通信服务。在此基础上，应用程序可以监控 HVAC&R 和其他 BAS。显然应用层是本协议所必需的。

如上所述，使用七层体系结构描述和构建 BACnet 网络，消耗资源较多，因此在 BAS 中不适用七层级模型，而是采用了四层级的简化结构模型。

按照 OSI 模型的方式构造 BACnet 协议体系结构，同时大量地采用现有的计算机网络及现代通信技术，使 BACnet 协议具有实现成本低和便于与其他计算机网络系统集成的特点。因此，由物理层、数据链路层、网络层和应用层组成 BACnet 简化体系结构，是实现 BAS 的最佳解决方式。

3.2.2　BACnet 标准支持的局域网

BACnet 是应用在 BAS 中的控制网络的通信标准，但 BACnet 网络不是指某一种特定的控制网络，BACnet 网络是一个由若干种网络组成的集合，这个集合中，包括了 LonWorks 控制总线、ARCnet 令牌总线局域网、MS/TP（主从/令牌）环网、PTP（点对点）网络、以太网，其中 MS/TP（主从/令牌）环网 + EIA-485 控制总线的网络组态、PTP（点对点）网络 + EIA-232 控制总

线的网络组态都在 BACnet 网络的集合中。所以说 BACnet 网络是一种专门用于楼宇自控领域的局域网。

如果 BAS 具备远程监控的性能，近程的区域通信功能由 BACnet 局域网承担，但远程通信的功能则由多种不同的城域网和广域网来承担，这里的广域网范围较宽，如电信网、Internet、移动无线网络、卫星无线网络、包括各种接入网的广域网，BACnet 网络内部的通信要完成的路由、中继、可靠的传输等问题由 BACnet 网络自身解决；远程通信网络中要完成的路由、中继、可靠的传输等问题都由电信网来处理，电信网可看成是 BACnet 网络外部的部分，部分异构的广域网也可以看成是 BACnet 网络外部的部分。

3.3　BACnet 网络中的一些基本组件

3.3.1　BACnet 网络中的物理网段、网段和网桥

在解释 BACnet 网络中的物理网段、网段之前，首先介绍 BACnet 设备的概念。任何一种支持用 BACnet 协议进行数字通信的真实或者虚拟的设备就叫 BACnet 设备。在一个应用进程中由 BACnet 用户元素所表示的那个部分则是 BACnet 用户。每个 BACnet 设备与物理介质相连，物理介质称之为物理网段，或者讲由 BACnet 节点直接相连的单一连续传输介质就是物理网段。一个或多个物理网段通过中继器在物理层连接，便形成了一个 BACnet 网段。

中继器是接收、放大整形和转发装置，从一个网络物理电缆里接收信号，将接收到的信号放大整形再转发到下一个网络物理电缆。而网桥则是智能化的中继器。

网桥主要用来连接局域网从而扩大局域网的规模。每个网桥连接两个网段，并能将一个网段中传输的数据帧转发到另一个网段。网桥以混合模式侦听每个网段，这样可以保证网桥能收到每个穿越网段的帧。然后网桥发送帧副本到另外一个网段上。网桥检查所收到的每个帧的帧头中的物理地址。网桥用源地址来判断计算机连到哪个网段上，并用目标地址来判断是否要转发该帧。由于网桥在不需要时就不转发帧，所有桥接网允许各自网段中的计算机间的通信同时进行。因此，桥接局域网的性能要优于简单的共享型局域网。

网桥工作在数据链路层的 MAC 子层，其基本功能是在不同局域网段之间转发帧。网桥从端口接收该接口所连接网段上的所有数据帧，每收到一个帧，就存在缓存区并进行差错校验；如果该帧没有出现传输错误而且目的站属于其他网段，则根据目的地址通过查找存有端口—MAC 地址映射的桥接表，找到对应的转发端口，将它从该端口上转发出去，否则丢弃该帧。如果数据帧的源站和目的站在同一个网段内，网桥不进行转发。

3.3.2　节点、半路由器和路由器

与通信传输介质相连的可寻址的设备就是网络节点，具体讲，是指网络中的一台电脑或其他设备与一个有独立地址和具有传送或接收数据功能的网络设备。节点可以是工作站、客户机、服务器、具有寻址能力的智能控制器，也可以是终端设备，拥有自己惟一网络地址的设备都是网络节点。

半路由器（half router）是一个设备或者节点，用在一个 PTP 连接的一端。两个半路由器形成一个路由器，并建立起一个有效的 PTP 连接。这里的 PTP 连接说明如下。

从 OSI 参考模型的应用层来看，可认为网络是由工作站和服务器组成的，但从传输层和网络层的角度看，工作站和服务器没有本质的区别，它们都是连接到网络上的一台机器，都可以用网络地址或名称来代替。它们之间的通信，就是所谓的点对点通信，也叫对等通信。在局域网上，

点对点通信意味着两个工作站可以直接对话而不用经过文件服务器中转。

PTP 技术又称对等互联网络技术，该技术依赖网络节点的计算能力和网络带宽。PTP 网络没有客户端或服务器的概念，只有平等的同级节点，同时对网络上的其他节点充当客户端和服务器。这种网络设计模型不同于客户端—服务器模型，在客户端—服务器模型中通信通常来往于一个中央服务器。

这里讲到的 PTP 网络要与网络通信技术中的 PTP 进行区别。通信网络中，基本的通信过程要求网络时钟同步，即整个网络各设备之间的时间或频率差保持在合理的误差水平内。网络时钟同步包括以下两个概念：时间同步和频率同步。PTP（Precision Time Protocol，精确时间协议）是一种时间同步的协议，其本身只是用于设备之间的高准确度时间同步，但也可被借用于设备之间的频率同步。应用了 PTP 的网络称为 PTP 域，PTP 域内有且只有一个同步时钟，域内的所有设备都与该时钟保持同步。

由网桥互联起来具有相同网络地址的一个或多个网段的集合成为网络。路由器则是工作在网络层能够将两个网络进行互联的重要设备，尤其是能够将两个异构网络实现互联的能力，是路由器的特色功能。BACnet 路由器能够将两个不同的 BACnet 网络互联在一起。

通过一个路由器即可访问的，并且没有使用中间路由器时，就是一个直接连接网络。

由某公司开发的 BACnet 路由器的外观如图 3-8 所示。



图 3-8　一个 BACnet 路由器的外观

BACnet 路由器由控制器/路由器组成，这些控制器处于网络层并在 BACnet/IP 网络、以太网、BACnet 和 MS/TP 网络之间路由 BACnet 信息。BACnet 路由器的主要性能参数如下：

1）支持 23 种 BACnet 对象类型，包括趋势、日程、日历和 PID 调节器的算法函数；

2）BACnet/IP 和 MS/TP 能与第三方通信以实现互操作；

3）10/100Mbit/s 以太网口；

4）支持 BACnet 广播信息设备；

5）提供最高级别的可靠性—存储应用程序、操作系统和运行实时数据；

6）闪存允许在线软件升级；

7）支持定制嵌入式网页服务器；

8）支持 BACnet 趋势对象；

9）支持 BACnet 日历和日程对象。

3.4　BACnet 网络的拓扑结构

为了适应各种具体的环境应用，BACnet 标准并没有规定严格的网络拓扑结构。BACnet 设备可以直接连接到以太网、MS/TP 网络、LonWorks 网络、PTP 网络和 ARCnet 网络中的一种网络上。这几种局域网可以通过 BACnet 路由器进一步互联。

如前所述，BACnet 设备接入物理网段，这里的物理网段是由物理介质和接入其中的 BACnet 设备组成的。

一个或多个物理网段通过中继器在物理层连接，便形成了一个 BACnet 网段。而一个 BACnet 网络则是由一个或多个 BACnet 网段通过网桥互联而成，物理网段、网段和 BACnet 网络的结构分别如图 3-9、图 3-10、图 3-11 所示。

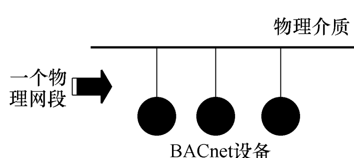


图 3-9　物理网段

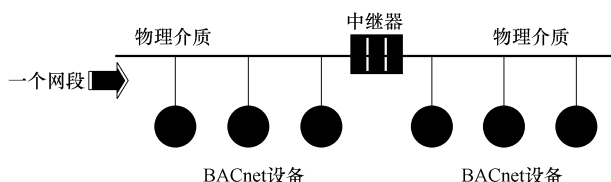


图 3-10　网段的结构

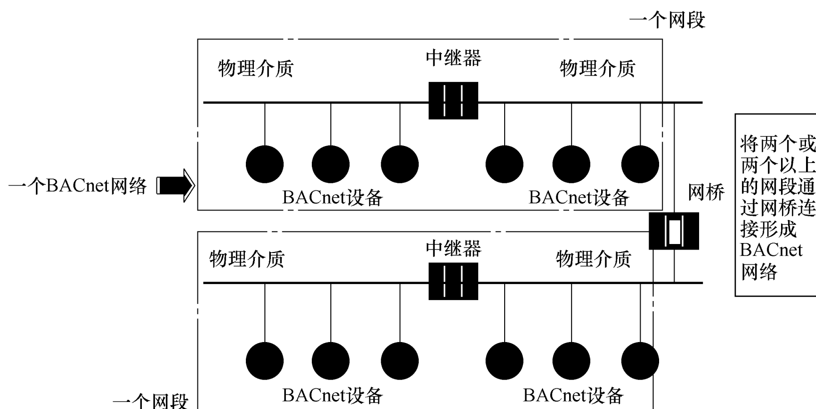


图 3-11　用网桥把网段连接起来形成 BACnet 网络

每个 BACnet 网络都形成一个单一的 MAC 地址域，这些在物理层和数据链路层上连接各个网段的设备，可以利用 MAC 地址实现报文的过滤。将使用不同 LAN 技术的多个网络，用 BACnet 路由器互联起来，便形成了一个 BACnet 互联网（internetwork）。如前所述，在一个 BACnet 互联网中，任意两个节点之间恰好存在着一条报文通路。这些概念如图 3-12 所示。

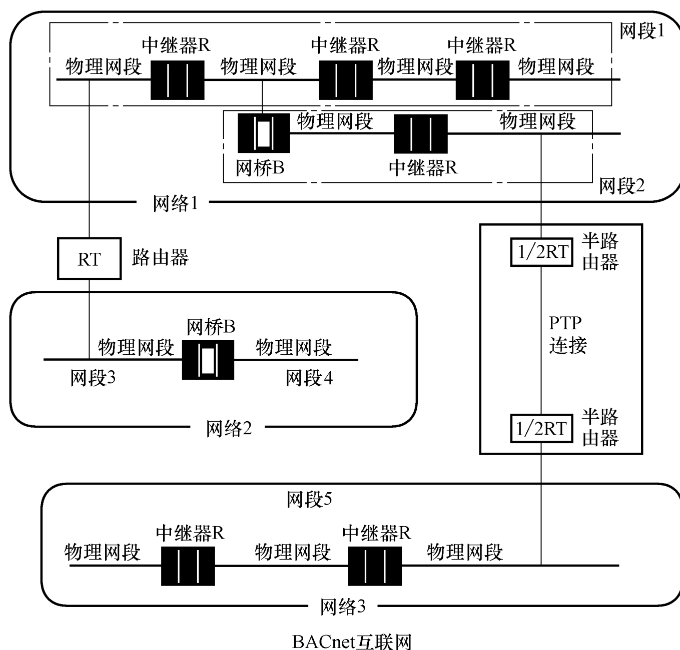


图 3-12　BACnet 互联网结构图

3.5　应用层

BACnet 标准中的第 5 应用层的部分叙述了：应用层模型、BACnet 报文的分段、BACnet APDU 的传输、应用层协议状态机、应用层协议时序图和应用层服务约定用法。

在 BACnet 体系结构中应用层处于最高层，因此距用户最近，属于互操作信息处理层。应用层的功能主要有：定义楼宇自控设备的 BACnet 对象模型；还要定义面向应用的通信服务。对象与服务是标准中定义互操作功能的两个主要内容。

BACnet 应用层的通信功能：①定义“证实服务” 和 “非证实服务；②定义控制和管理与通信报文长度有关的“分段和重组” 功能；③检错和纠错机制。因此，面向应用的通信服务包括应用层服务及其类型与结构。

BACnet 标准基于 BACnet 对象和应用层服务定义了事件与报警监控机制和并发事件处理的优先权机制。

3.5.1　应用层的模型

1. 应用进程

建立 BACnet 应用层模型的目的是为了清楚地描述应用层与应用程序之间的交互、应用层与协议栈中下面各层次的关系，以及应用层与远程设备中应用层的对等交互。

在网络通信的过程中，进程是指在系统中正在运行的一个应用程序；进程是处于运行过程中的程序实体，一个通信进程由程序代码、数据和进程控制块 3 个部分构成。程序代码规定了进程的结构，规定了处理数据的逻辑关系和顺序；数据是计算及数据处理的对象；进程控制块是操作系统内核为了控制进程所建立的数据结构，是操作系统用来管理进程的内核对象。多个进程可以在操作系统的协调下，在内存中平行运行。计算机网络应用程序的运行，是以进程的形式展开的。网络操作系统在运行中，可以同时打开和运行多个不同的应用程序，每一个网络应用程序都是一个网络应用进程。

2. BACnet 应用进程的模型

BACnet 标准中这样定义一个应用进程：在一个系统中，针对某个应用而进行信息处理的功能模块。在应用进程中有一部分位于应用层之外，它们与通信功能无关，这些部分都不属于 BACnet 标准的规范范围。我们将应用进程中位于应用层内的部分称为应用实体，即一个应用实体是应用进程中与 BACnet 通信功能相关的部分。一个应用程序通过应用编程接口（Application Program Interface，API）与应用实体进行交互。BACnet 应用进程的模型如图 3-13 所示，阴影部分是应用进程位于 BACnet 应用层中的部分。

图 3-13 中的应用实体包括：BACnet 用户元素（User Element）和 BACnet 应用层服务元素（Application Service Element，ASE）。BACnet 应用层服务元素描述了应用服务或功能的集合。BACnet 用户元素执行多种功能，并且支持本地的 API，它描述每个应用服务中“服务过程” 的实现。BACnet 用户元素负责：保存事务处理的上下文信息，包括产生请求标识符（ID），记录哪个标识符是与哪个设备发出的应用服务响应相对应的；还有一个功能是保存超时重传机制所需的超时计时器；第

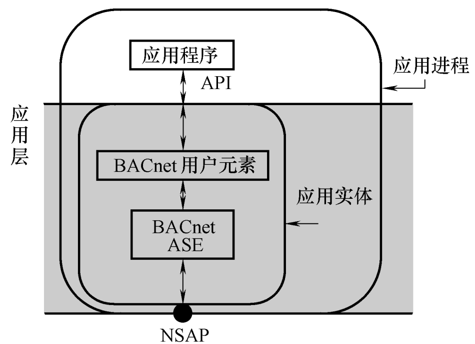


图 3-13　BACnet 应用进程的模型

三个功能是将一个设备的行为映射成为 BACnet 对象。

两个对等应用进程间的信息交换，被表示成抽象服务原语的交换。这些服务原语用来传递一些特定的服务参数，标准中定义了 4 种服务原语：请求（request）、指示（indication）、响应（response）和证实（confirm）。包含在这些原语中的信息，由各种协议数据单元（Protocol Data Unit，PDU）传递。

有证实（confirmed）服务的符号标记是 CONF_SERV，指明使用 BACnet 的有证实服务 PDU。无证实（unconfirmed）服务的符号标记是 UNCONF_SERV，指明使用 BACnet 的无证实服务 PDU。分段确认（segment acknowledge）服务的符号标记是 SEGMENT_ACK，指明使用 BACnet 的分段确认 PDU。差错（error）服务的符号标记是 ERROR，指明使用 BACnet 的差错 PDU。拒绝（reject）服务的符号标记是 REJECT，指明使用 BACnet 的拒绝 PDU。中止（abort）服务的符号标记是 A-BORT，指明使用 BACnet 的中止 PDU。

BACnet 设备（BACnetDevice）是指任何一种支持用 BACnet 协议进行数字通信的真实的或者虚拟的设备。每一个 BACnet 设备必须且只能包含一个设备（Device）对象。每一个 BACnet 设备都由一个 NSAP 惟一定位，在 NASP 中，包含了一个网络编号和一个 MAC 地址。

在多数情况下，一个 BACnet 设备就是一个物理设备。然而在某些情况下，一个单一的物理设备也可以形成多个“虚拟的”BACnet 设备。

3. BACnet 协议栈及数据流

BACnet 协议栈及数据流的移动、封装、BACnet 协议栈的应用层及各个不同层级的数据单元对应关系如图 3-14 所示。

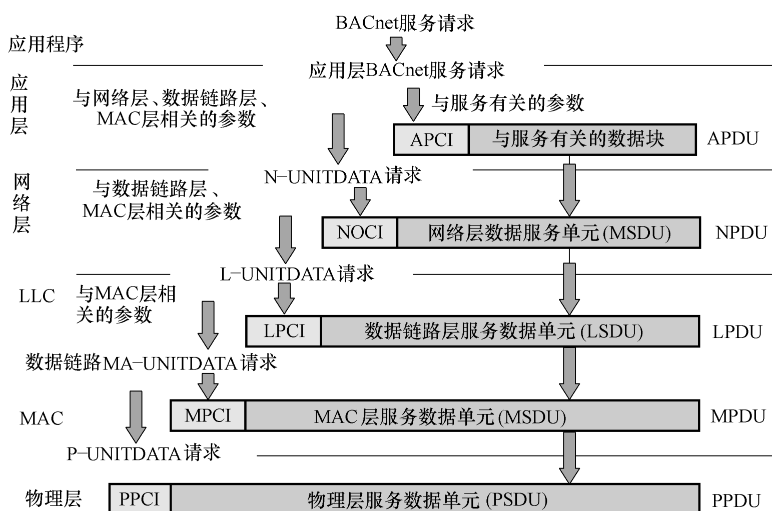


图 3-14 BACnet 协议栈及数据流

针对 BACnet 协议栈应用层提出的具体服务请求，应用程序进行响应：向应用层提供满足特定服务的数据，然后加上应用协议控制信息（APCI）作为应用层协议数据单元（Application Protocol Data Unit，APDU），构成了网络层服务原语的数据部分，并通过网络层服务访问点（Network Service Access Point，NSAP）下传到网络层。按照这样的方式，这个请求进一步下传到本地设备协议栈的以下各层。于是，报文就这样被传送到远程的设备，并在远程设备协议栈中逐级上传，最后指示原语看起来似乎是直接从远程的 BACnet 应用层服务元素上传到远程的 BACnet 用户元素。同样，任何从远程设备发回的响应，也是以这样的方式回传给请求设备的。

APDU 通过 NSAP 下传到网络层，网络层将整个 APDU 作为网络层的服务数据单元（NSDU）

加上网络层协议的控制信息（NPSI）组成网络层协议数据单元（NPDU）；NPDU 下传到数据链路层后，类似地组装成数据链路层协议数据单元（LPDU）；最后的物理层数据单元是 PPDU，图 3-14 中的 LPCI、MPCI 和 PPCI 分别是数据链路层协议控制信息、MAC 层协议控制信息和物理层协议控制信息。

应用实体通过 API 与应用程序除了交换服务原语和服务参数外，还交换接口控制信息（Interface Control Information，ICI）参数。ICI 的具体内容取决于服务原语的类型。应用实体将接收到的 ICI 参数下传至下面各层，从而使得各层可以构建自己的 PDU。而由应用实体回传给应用程序的 ICI 参数，则包含了下面各层从各自 PDU 中得到的信息。

3.5.2　有证实的应用层服务和无证实的应用层服务

1. 有证实的应用层服务

BACnet 基于 C/S 模式定义了有证实的应用层服务。客户端通过具体的服务请求实例向服务器端请求服务，服务器端通过响应请求来为客户端提供服务，这种关系如图 3-15 所示。在客户端和服务器端进行数据交互过程中，提出服务请求的 BACnet 用户，称为请求方 BACnet 用户；实施响应并担当服务器角色的 BACnet 用户，称为响应方 BACnet 用户。

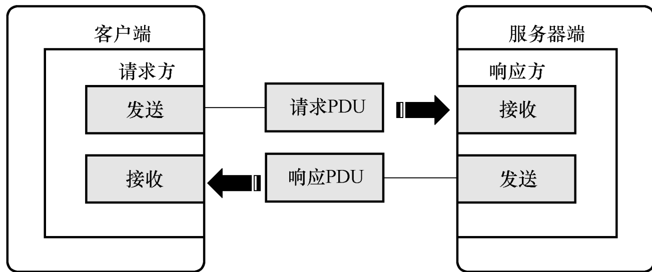


图 3-15　客户端与服务器端的关系

有证实应用层服务的过程是：由请求方 BACnet 用户发出一个有证实服务请求原语（CONF_SERV. request），形成请求 PDU，发送给响应方 BACnet 用户。当这个请求 PDU 到达响应方 BACnet 用户时，响应方 BACnet 用户则收到一个有证实服务指示原语（CONF_SERV. indication）。同样，由响应方 BACnet 用户发出的一个有证实服务响应原语（CONF_SERV. response），形成响应 PDU 回传给请求方 BACnet 用户。当响应 PDU 到达请求方 BACnet 用户时，请求方 BACnet 用户则收到一个有证实服务证实原语（CONF_SERV. confirm）。无论是请求方 BACnet 用户还是响应方 BACnet 用户，在该过程中都进行了 PDU 的发送和接收。因此，所谓“发送方 BACnet 用户”指的是发起一个 PDU 发送的 BACnet 用户；而“接收方 BACnet 用户”指的是接收到 PDU 到达指示的 BACnet 用户。

2. 无证实的应用层服务

在无证实应用层服务中，不存在 C/S 模式，因此也就没有“请求方 BACnet 用户”和“响应方 BACnet 用户”的说法了，只有“发送方 BACnet 用户”和“接收方 BACnet 用户”，BACnet 标准用它们来定义无证实的应用层服务的服务过程。

3.5.3　BACnet 报文的分段

为了实现长报文的传输，BACnet 采取了应用层报文分段的机制来对报文进行分段。在 BACnet 中只有有证实请求（Confirmed-Request）和复杂确认（Complex-ACK）报文可能需要分段。

1. 报文分段规则

（1）APDU 数据流的分段规则

每个 BACnet 报文都是一个由标记符和数据组成的序列，这个序列是按照给定编码规则进行编码而形成的。对于 APDU 数据流进行分段的规则如下：

1）一个完整的报文尽可能作为一个 APDU 发送。

2）当一个完整的报文不可能作为一个 APDU 发送时，则应分段成最少个数的多个 APDU 发送。

3）对报文进行分段时，必须以 1B（8bit）作为最小的分割单位。

（2）APDU 最大长度的确定

在 BACnet 报文中，APDU 的最大长度不是固定的，其具体值是下列各长度值中的最小值：

1）设备所能发送的 APDU 的最大长度。这个长度一般与本地设备的缓冲区大小等因素有关。

2）BACnet 互联网所能传输到远程设备的 APDU 的最大长度一般由本地、远程以及中间传输网络的数据链路所允许的网络层协议数据单元（NPDU）的最大长度所决定。

3）远程设备所能接收的 APDU 的最大长度，其值不能小于 50B。

如果报文的发送设备是请求方 BACnet 用户，也就是说要发送的 APDU 是 BACnet 有证实请求 PDU（BACnet-Confirmed-Request-PDU）或者是 BACnet 无证实请求 PDU（BACnet-Unconfirmed-Request-PDU），这时远程设备所能接收 APDU 的最大长度由远程设备对象的最大 APDU 长度支持属性所确定。或通过向远程设备发送一个 Who-Is 服务请求，使其回复一个 I-Am 服务响应，通过读取其中的‘最大 APDU 长度支持（Max APDU Length Accepted）’参数来获得该属性值。

如果报文的发送设备不是请求方 BACnet 用户，也就是说要发送的 APDU 是 BACnet 复杂确认 PDU（BACnet-Complex-ACK-PDU），这时远程设备所能接收的 APDU 的最大长度由本报文所响应的那个 BACnet 有证实请求 PDU 中的‘最大 APDU 长度支持’参数所确定。

2. 分段协议控制信息（PCI）

在 BACnet 协议栈及数据流流向的分析中知道，上一层的数据单元送到下一层时，整体作为下一层的数据部分，然后再加上改层的控制信息，形成本层数据单元。

如果报文经编码处理后生成的 APDU 的长度小于或等于允许最大可传输长度的值，则‘报文分段’和‘后继’两个参数都应设置为 FALSE。

由有证实请求报文或复杂确认报文的每个分段所生成 APDU 的头部，还有两个条件参数：第一个条件参数是‘序号’，这个 8 位二进制无符号整数被报文分段的发送方用来指定当前分段在整个报文分段序列中的位置；另一个条件参数是‘预设窗口尺寸（Proposed Window Size）’，它同样是一个 8 位二进制无符号整数。报文分段的发送方用该参数来指明，在收到一个分段确认（SegmentAck）报文之前，它预备发送的最大报文分段数。

起始分段中的“序号”参数应设置为 0。报文分段接收方在收到一个或一组报文后，会向发送方发送一个包含有“序号”参数的分段确认 PDU。序号的大小，等于最近一次成功接收到的分段的“序号”参数值。这样，这个分段确认 PDU 不但用来请求发送方继续发送后一个或一组分段，还用来对先前一个分段或者是先前所有未被确认的分段（当 Window Size 值大于 1 时）确认。

当然，在分段传输交互过程中的任何一方如果想中止交互过程，只要发送一个中止 PDU（Abort-PDU）即可。

3.5.4　BACnet APDU 的传输

1. 有证实请求报文的传输

客户端设备在下列两种情况下将启动一个计时器，用来计量对所关注的报文确认的时间。这两种情况是：①传输了一个完整未分段有证实请求报文后；②在等待接收分段有证实请求报文最后一个分段所对应的分段确认报文的确认信息时。一旦收到了一个关于那个还没有确认的有证实请求报文所发的差错 APDU、拒绝 APDU、中止 APDU、简单确认（SimpleACK）APDU 或复杂确

认（ComplexACK）APDU，则停止计时，同时通知客户应用程序。如果计时器的时间值超出了客户设备对象的 APDU 超时（APDU_TimeOut）属性值，则整个有证实请求报文重新发送，计时器重新计时。所有有证实请求报文的超时重发过程都按照上述过程进行，直至重发次数超出了客户端设备对象的 APDU 重发次数（Number_Of_APDU_Retries）属性所规定的次数。若超出规定值仍未收到响应，该报文将被丢弃，同时通知客户应用程序。

2. 分段的有证实请求报文的传输

客户端设备在发送分段的有证实请求 PDU 的第一个分段之前，首先选择一个预设窗口尺寸值，以表示它在收到一个分段确认报文之前，一次准备发送的报文分段最大个数。预设窗口尺寸值的选取由开发者自己决定，这只与客户端设备有关，但是其取值范围限制在 1～127。这个值由有证实请求 PDU 分段的‘预设窗口尺寸’参数表示，并且同一报文的每个分段该参数值都应该相同。

在发送了有证实请求报文的第一个分段后，客户端设备将启动一个计时器，用来计量对该分段确认的时间。一旦收到了一个关于这个还没有确认的有证实请求报文分段所发的差错 APDU、拒绝 APDU、中止 APDU 或分段确认 APDU，则停止计时。如果计时器的时间值超出了客户设备对象的 APDU 分段超时（APDU_Segment_Timeout）属性值，则重发这个分段，并将计时器置零，重新计时。所有分段的超时重发过程都按照上述过程进行，直至重发次数超出了客户端设备对象中 APDU 重发次数属性所规定的次数。若超出规定值仍未收到响应，整个报文将被丢弃，同时通知客户应用程序。

当服务器端设备收到分段的有证实请求 PDU 报文的第一个分段后，将会选择一个实际窗口尺寸（Actual Window Size）值，以表示它在发送一个分段确认报文之前，一次准备接收的报文分段最大个数。实际窗口尺寸值的选取由开发者自己决定，这只与服务器设备有关，但是它还不能大于有证实请求 PDU 中的‘预设窗口尺寸’参数值，而且其取值范围限制在 1～127。对同一有证实请求报文所回应的所有分段确认报文，其实际窗口尺寸值都应该相同。需要特别说明的是，不管实际窗口尺寸值是多少，服务器设备在收到有证实请求报文的第一个分段后，应立即响应一个分段确认报文。

在收到第一个分段确认 APDU 后，客户端设备得到该报文中携带的‘实际窗口尺寸（actual-window-size）’参数值，并将该值设置成客户设备自己的实际窗口尺寸。当客户端设备正在发送一个有证实请求报文分段序列的过程中，即使需要确认的分段数量小于实际窗口尺寸值，都可能会收到拒绝 APDU、中止 APDU 或分段确认 APDU。

3. 分段的复杂确认报文的传输和分段确认 APDU 的传输

（1）分段的复杂确认报文的传输

服务器端设备在发送分段复杂确认 PDU 的第一个分段之前，首先选择一个预设窗口尺寸值，以表示它在收到一个分段确认报文之前，一次准备发送的报文分段最大个数。预设窗口尺寸值的选取由开发者自己决定，这只与服务器端设备有关，但是其取值范围限制在 1～127。复杂确认 PDU 的每一个分段中都有一个‘预设窗口尺寸（proposed-window-size）’参数，携带服务器端设备的预设窗口尺寸值，并且同一报文的每个分段的这个参数值都应该相同。

在传输完第一个分段后，服务器端设备将启动一个计时器，用来计量对该报文分段确认的时间。一旦收到了一个关于这个还没有确认的复杂确认报文分段所发送的中止 APDU 或分段确认 APDU，则停止计时。如果计时器的时间值超出了服务器设备对象的 APDU 分段超时属性值，则重发这个分段，并将计时器置零，重新计时。所有分段的超时重发过程都按照上述过程进行，直至重发次数超出了服务器端设备对象中 APDU 重发次数属性所规定的次数。若超出规定值仍未收到响应，整个报文将被丢弃。

当客户端设备收到分段的复杂确认 APDU 报文的第一个分段后，将会选择一个实际窗口尺寸值，以表示它在发送一个分段确认报文以前，一次准备接收的报文分段最大个数。实际窗口尺寸值的选取由开发者自己确定，这只与客户设备有关，但是它不能大于复杂确认 PDU 中的‘预设窗口尺寸’参数值，而且其取值范围限制在 1～127。对同一复杂确认的所有分段确认，其实际窗口尺寸参数值都应该相同。需要特别说明的是，不管实际窗口尺寸是多少，客户端设备在收到复杂确认报文的第一个分段后，就应立即发送一个分段确认报文。

在收到一个分段确认 APDU 后，服务器端设备得到该报文中携带的‘实际窗口尺寸’参数值，并将该值设置成服务器设备自己的实际窗口尺寸。服务器端在发送复杂确认报文分段的过程中，即使需要确认的分段数量小于实际窗口尺寸值，都可能会收到中止 APDU 或分段确认 APDU。

（2）分段确认 APDU 的传输

分段确认 APDU 是分段接收方设备用来确认发送方的信息。在以下 4 种情况下，设备应传送一个分段确认报文：

1）设备收到分段的报文的第一个分段。

2）设备收到未确认的、有序的、数量为实际窗口尺寸的多个报文分段构成的序列。

3）设备收到一个乱序分段报文（可能表明丢失了某个分段）。

4）设备收到报文的最后一个分段。

4. 重复的 APDU 和报文分段

（1）客户端事务处理状态机的中止

当使用 BACnet 标准定义的差错重传机制时，在报文传输的交互处理中，必然存在收到重复报文或分段的可能。在客户端，当发送了有证实请求 APDU 报文（或报文的第一个分段）之后，将创建事务处理状态机，进行事务处理。当出现以下 4 种情况之一时，客户端的事务处理中止，同时结束该事务处理状态机：

1）当收到服务器端设备发来的、包含有这个事务处理的调用标识符（invokeID）的 5 种报文时。这 5 种报文分别是：简单确认 APDU、不分段的复杂确认 APDU、差错 APDU、拒绝 APDU 和中止 APDU。

2）收到服务器发来的分段的复杂确认 APDU 的最后一个分段，并发送了相应的分段确认 APDU 后。

3）当超时重传次数用尽后。

4）在向服务器发送了包含有该事务处理的调用标识符的中止 APDU 后（例如，客户端中止这个事务处理）。

（2）服务器端事务处理状态机的中止

在服务器端，当收到了证实请求 APDU 报文（或报文的第一个分段）之后，将创建事务处理状态机，进行事务处理。当出现以下 4 种情况之一时，服务器端的事务处理中止，同时结束该事务处理状态机：

1）当向客户端设备发送完成包含有这个事务处理的调用标识符的 5 种报文时。这 5 种报文分别是：简单确认 APDU、不分段的复杂确认 APDU、差错 APDU、拒绝 APDU 和中止 APDU。

2）当收到客户端设备发来的关于分段的复杂确认 APDU 最后一个分段的分段确认 APDU 之后。

3）当接收到客户端发来的包含有该事务处理调用标识符的中止 APDU 后。

4）在传输一个分段的复杂确认 APDU 的过程中，超时重传次数达到规定值仍未成功时。

（3）重复报文的处理

重复报文或重复报文分段的处理过程如下：

1）当服务器接收到一个重复的有证实请求报文时，如果服务器具有识别重复的有证实请求报文的能力，则该重复的报文将被服务器丢弃。否则，服务器仍然响应这个重复的有证实请求报文，在这种情况下，客户将根据这个服务器响应报文中的调用标识符不与任何一个当前的事务处理状态机绑定这个情况，而丢弃这个响应报文。

2）当服务器接收到一个重复的有证实请求报文分段，即已经收到并针对该分段发送了分段确认报文时，服务器将丢弃这个重复的分段，并回传一个合适的分段确认 APDU。

3）当客户接收到一个重复的复杂确认报文分段，即已经收到并针对该分段发送了分段确认报文时，客户将丢弃这个重复的分段，并回传一个合适的分段确认 APDU。

4）当一个设备接收到一个重复的分段确认 APDU 时，该设备将丢弃这个重复的分段确认 APDU。

3.5.5　应用层协议状态机

1. APDU 分类

BACnet 的 APDU 可以分为两种：一种是由请求方 BACnet 用户（客户）发送的；另一种是由响应方 BACnet 用户（服务器）发送的。所有的 BACnet 设备都应能工作在响应方 BACnet 用户状态，从而能够接收请求方 BACnet 用户发来的 APDU。另一方面，许多设备还可以工作在请求方 BACnet 用户状态，接收响应方 BACnet 用户发来的 APDU。

（1）请求方 BACnet 用户（客户）发送的 APDU

1）BACnet 无证实请求 PDU（BACnet-Unconfirmed-Request-PDU）；

2）BACnet 有证实请求 PDU（BACnet-Confirmed-Request-PDU）；

3）BACnet 分段确认 PDU（BACnet-SegmentACK-PDU）（参数‘服务器（server）’= FALSE）；

4）BACnet 中止 PDU（BACnet-Abort-PDU）（参数‘服务器’=FALSE）。

（2）响应方 BACnet 用户（服务器）发送的 APDU

1）BACnet 简单确认 PDU（BACnet-SimpleACK-PDU）；

2）BACnet 复杂确认 PDU（BACnet-ComplexACK-PDU）；

3）BACnet 差错 PDU（BACnet-Error-PDU）；

4）BACnet 拒绝 PDU（BACnet-Reject-PDU）；

5）BACnet 分段确认 PDU（BACnet-SegmentACK-PDU）（参数‘服务器’=TRUE）；

6）BACnet 中止 PDU（BACnet-Abort-PDU）（参数‘服务器’=TRUE）。

（3）事务处理状态机（TSM）

请求方和响应方 BACnet 用户为每一个事务处理都要创建并且维护一个 TSM。该 TSM 在事务开始时创建，在事务结束时中止。其过程如下：由空闲（IDLE）状态转变进入到 TSM 状态，建立 TSM；由 TSM 状态转变到空闲状态，中止 TSM。一个事务处理由客户 BACnet 地址（BACnetAddress）、服务器 BACnet 地址和调用标识符（如果存在的话）惟一确定。

当一个 PDU 从网络层传递给应用层时，应用层软件检查 PDU 的类型、源 BACnet 地址、目的 BACnet 地址、调用标识符（如果存在的话），确定 PDU 的类型（是请求方还是响应方 BACnet 用户）以及应送给哪个 TSM 处理。如果不存在对应的 TSM，必须新建一个 TSM。

当一个请求从应用程序传递给应用层时，应用层软件检查请求的类型、源 BACnet 地址、目的 BACnet 地址、调用标识符（如果存在的话），确定请求的类型（是请求方还是响应方 BACnet 用户）以及应送给哪个 TSM 处理。如果不存在对应的 TSM，必须新建一个 TSM。

为了简化状态机的描述，这里仅给出应用实体所进行分段的情况，应用程序所进行的分段也是存在的。在这种情况下，当前的 TSM 无论是接收一个分段还是一组分段或是发送分段确认，分段都将通过更新后的 TSM 传递给应用程序，而分段确认则只沿着从应用程序通过分段确认请求（SEGMENT_ACK. request）原语这个方向传递。当更新的状态机接收到分段确认 PDU，就向应用程序传递一个分段确认指示（SEGMENT_ACK. indication）原语。

2. 变量、参数与函数

（1）变量

在每个事务处理状态机的实例中，都使用了一些变量，部分变量定义如下：

1）重发计数（RetryCount）：用于计数 APDU 重发的次数。

2）分段重发计数（SegmentRetryCount）：用于计数分段重发的次数。

3）分段发送完毕（SentAllSegments）：　用于控制 APDU 的重发及接收服务器的响应。

4）最近序号（LastSeqenceNumber）：用于保存顺序接收的最近一个分段的序号。

（2）InWindow 函数和 FillWindow 函数

1）InWindow 函数：函数“InWindow”用于完成对两个序号（由无符号 8 位整数构成）的模 256 运算。所有的计算和比较都是在 8 位无符号整数基础上模 256 运算。

对于函数 InWindow（seqA，seqB）

① 如果参数 seqA 减去参数 seqB 的差再模 256，其结果少于实际窗口尺寸，则返回 TRUE。

② 否则返回 FALSE。

2）FillWindow 函数：函数“FillWindow”用于发送一组 PDU 分段，该 PDU 分段序列的数目或者正好填充窗口，或者是一个报文的最后部分分段。在收到一个分段确认 APDU 到发送下一个分段序列，时间间隔不能大于 T_{seg} 值。分段序列中两个相邻分段发送的时间间隔，也不能大于 T_{seg} 值。

3. 请求方 BACnet 用户（客户）状态机

（1）空闲状态

在空闲状态，设备等待着本地应用程序请求服务。可以发送：

1）发送无证实请求（SendUnconfirmed）；

2）发送有证实不分段请求（SendConfirmedUnsegmented）；

3）发送有证实分段请求（SendConfirmedSegmented）。

可以接收到：

1）意外分段信息（UnexpectedSegmentInfoReceived）；

2）意外 PDU（UnexpectedPDU_Received）。

（2）分段请求状态

在分段请求状态，设备等待接收针对 BACnet 有证实请求 PDU 所发出的一个或几个分段的 BACnet 分段确认 PDU 的确认报文。

1）接收到重复确认 PDU（DuplicateACK_Received）；

2）接收到新确认 PDU（NewACK_Received）；

3）接收到最后一个确认 PDU（FinalACK_Received）；

4）分段超时（Timeout）；

5）最终超时（FinalTimeout）；

6）接收到中止 PDU（AbortPDU_Received）；

7）接收到简单确认 PDU（SimpleACK_Received）；

8）接收到不分段复杂确认 PDU（UnsegmentedComplexACK_Received）；

9）接收到分段复杂确认 PDU（SegmentedComplexACK_Received）；

10）接收到差错 PDU（ErrorPDU_Received）；
11）接收到拒绝 PDU（RejectPDU_Received）；
12）接收到意外 PDU；
13）发送中止 PDU（SendAbort）。
（3）等待证实状态
在等待证实状态，设备等待接收针对 BACnet 有证实请求 PDU 所发出的响应。
1）接收到简单确认 PDU；
2）接收到不分段复杂确认 PDU；
3）接收到分段复杂确认 PDU；
4）接收到差错 PDU；
5）接收到拒绝 PDU；
6）接收到放弃 PDU；
7）接收到分段确认 PDU；
8）接收到意外 PDU；
9）请求超时不分段（TimeoutUnsegmented）；
10）请求超时分段（TimeoutSegmented）；
11）最终超时；
12）发送放弃 PDU。
（4）分段证实状态
在分段证实状态，设备等待接收一个或者几个针对 BACnet 分段确认 PDU 的响应分段。
1）接收到新分段但无空间保存（NewSegmentReceived_NoSpace）；
2）接收到新的分段；
3）接收到一组分段中的最后分段（LastSegmentOfGroupReceived）；
4）确认 PDU，重启分段计时器，最后进入分段证实状态，等待接收后续分段；
5）接收到复杂确认的最后分段（LastSegmentOfComplexACK_Received）；
6）接收到乱序分段（SegmentReceivedOutOfOrder）；
7）接收到中止 PDU；
8）接收到意外 PDU；
9）分段超时；
10）发送中止 PDU。

4. 响应方 BACnet 用户（服务器）状态机

（1）空闲状态
在空闲状态，设备等待从网络层传递来一个 PDU。
1）接收到无证实请求 PDU；
2）接收到不分段有证实请求 PDU；
3）接收到分段证实请求 PDU 且不支持；
4）接收到分段证实请求 PDU；
5）接收到中止 PDU；
6）接收到意外 PDU。
（2）分段请求状态
在分段请求状态，设备等待接收 BACnet 有证实请求 PDU 的分段。
1）接收到新的分段；

2）接收到一组分段中的最后分段；
3）接收到报文最后分组；
4）接收到乱序分段；
5）接收到中止 PDU；
6）接收到意外 PDU；
7）分段超时；
8）发送中止 PDU。
（3）等待响应状态
在等待响应状态，设备等待本地应用程序针对 BACnet 有证实请求 PDU 所做出的响应。
1）发送简单确认 PDU；
2）发送不分段复杂确认 PDU；
3）无法发送分段复杂确认 PDU（CannotSendSegmentedComplexACK）；
4）发送分段复杂确认 PDU；
5）发送差错 PDU；
6）发送中止 PDU；
7）发送拒绝 PDU；
8）接收到中止 PDU；
9）接收到重复的请求 PDU；
10）接收到重复分段 PDU；
11）接收到意外 PDU；
12）分段超时。
（4）分段响应状态
在分段响应状态，设备等待接收一个 BACnet 分段确认 PDU，此 PDU 用于对 BACnet 复杂确认 PDU 中的一个或几个分段进行确认。
1）接收到重复确认 PDU；
2）接收到新确认 PDU；
3）接收到最后一个确认 PDU（FinalACK_Received）；
4）分段超时；
5）最终超时；
6）接收到中止 PDU；
7）接收到意外 PDU；
8）发送放弃 PDU。

3.5.6 BACnet 对象

1. BACnet 的标准对象

BACnet 采用面向对象技术，提供一种表示楼宇自控设备的标准。在 BACnet 体系中，网络设备通过读取、修改封装在应用层 APDU 中的对象数据结构，实现互操作。BACnet 目前定义了 23 个对象，如图 3-16 所示，各个对象的说明见表 3-1，每个对象都必须有 3 个属性：对象标志符（Object_Identifier）、对象名称（Object_Name）和对象类型（Object_Type）。其中，对象标志符用来惟一标识对象；BACnet 设备可以通过广播自身包含的某个对象的对象名称，与包含相关对象的设备建立联系。BACnet 协议要求每个设备都要包含“设备对象”，通过对其属性的读取可以让网络获得设备的全部信息。

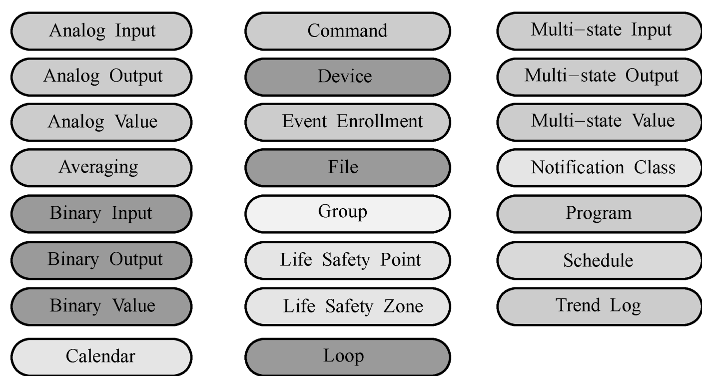


图 3-16 BACnet 标准中的 23 个对象

表 3-1 BACnet 对象应用举例

	对象名称	应用举例
01	模拟输入 Analog Input	模拟传感器输入如机械开关 On/Off 输入
02	模拟输出 Analog Output	模拟控制量输出
03	模拟值 Analog Value	模拟控制设备参数如设备阈值
04	数字输入 Binary Input	数字传感器输入如电子开关 On/Off 输入
05	数字输出 Binary Output	继电器输出
06	数字值 Binary Value	数字控制系统参数
07	命令 Command	向多设备多对象写多值如日期设置
08	日历表 Calender	程序定义的事件执行日期列表
09	时间表 Schedule	周期操作时间表
10	事件登记 Event Enrollment	描述错误状态事件如输入值超界或报警事件。通知一个设备对象,也可通过“通知类”对象通知多设备对象
11	文件 File	允许访问(读/写)设备支持的数据文件
12	组 Group	提供单一操作下访问多对象多属性
13	环 Loop	提供访问一个“控制环”的标准化操作
14	多态输入 Multi-state Input	表述多状态处理程序的状况,如制冷设备开、关和除霜循环
15	多态输出 Multi-state Output	表述多状态处理程序的期望状态,如制冷设备开始冷却、除霜的时间
16	通知类 Notification Class	包含一个设备列表,配合“事件登记”对象将报警报文发送给多设备
17	程序 Program	允许设备应用程序开始和停止、装载及卸载,并报告程序当前状态
18	设备 Device	其属性表示设备支持的对象和服务以及设备商和固件版本等信息
19	生命安全点 Life Safety Point (LSP)	生命安全检测点的信息检测(定义检测生命安全信息的单个检测设备,如探测火灾的烟感器)
20	生命安全区 Life Safety Zone (LSZ)	生命安全区域的信息检测(定义生命安全区域信息的检测,如由多个烟感器形成的生命安全区域信息处理过程)
21	多态值 Multi-State Value	虚拟的多态值(存在于软件中的多态制值,如三态开关的设定值,某个逻辑计算过程的中间值等)
22	日程计划 Schedule(SCHED)	预期时间的操作运行(对 BAS 的操作运行进行计划和安排,以便在计划的时间内自动运行)
23	趋势记录 Trend Log(TLOG)	记录单个运行数据(记录和存储某个运行数据,或作为运行数据库,以供查询和审计)

2. 定义 BACnet 对象的目的

由于在全球范围内由不同厂家开发的 BAS 多种多样，即面对多种多样的楼宇自控设备，用统一的方法去表示和标识它们，通过楼宇自控网络成为能够互相识别和访问的实体，只有实现了在楼宇自控网络中能够互相准确辨识和访问，才能实现互通信，才能够在互通信的基础上实现互操作。因此进行 BACnet 对象的定义，解决楼宇自控设备的互相识别、访问是实现楼宇自控设备互操作的关键。

定义了 BACnet 标准对象以后，就可以用 BACnet 标准对象的组合来实际模拟代替和表示楼宇自控设备或描述 BAS。

3. BACnet 对象与楼宇自控设备的对应关系

由于定义了标准 BACnet 对象，就可以进一步地用标准 BACnet 对象进行组合来实现对具体楼宇自控设备的代替、描述和表示。例如，一个压差开关就可以由一个 DEV（设备）对象和一个 DI 对象组合而成；一个智能温度传感器就可以简单地用一个 DEV 对象和一个 AI 对象组合进行表示，用标准 BACnet 对象组合模拟描述如图 3-17 所示。

设定某一楼宇自控设备有 3 个数字量输入和 2 个模拟量输入，2 个模拟控制输出和 1 个闭环控制逻辑，如果不考虑其他的 BAS 功能（如自动报警、联动关系、日程计划等功能），可用图 3-18 所示的 8 个标准 BACnet 对象实例组合进行表示。

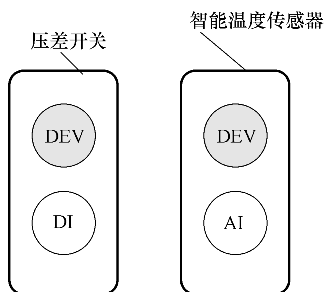


图 3-17　用标准 BACnet 对象组合模拟器件

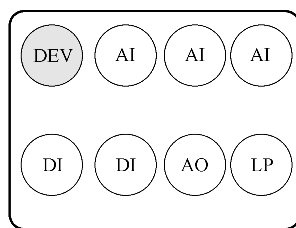


图 3-18　用标准 BACnet 对象组合一个设备

BACnet 标准在利用标准对象组合模拟楼宇自控设备的方式，不必考虑使用 BACnet 标准对象的顺序，但规定一个 BACnet 自控网络节点有且仅有一个 DEV 对象实例。在 BACnet 标准中，按规则采用 BACnet 对象表示的设备叫做“BACnet 设备”，BACnet 楼宇网络自控系统就是由若干个这样的“BACnet 设备”组成的系统。

BACnet 设备使用相关的对象进行描述，每一对象都有一组属性，设备的特征可以通过属性值表现出来。对象还提供服务，这些服务是与设备通信有关的命令和响应。一个 BACnet 设备由一组对象表示，尽管 BACnet 定义了 23 个对象，但一般情况下一个具体的 BACnet 设备仅由数个对象进行描述就已经足够了，在中文描述的情况下用一组对象表示一个 BACnet 设备，如图 3-19 所示。

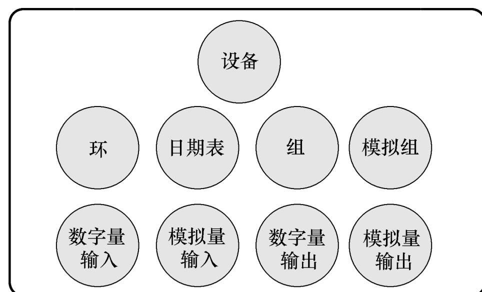


图 3-19　用一组对象表示一个 BACnet 设备

4. BACnet 标准对象定义中的属性

面向对象的程序设计语言中的对象通常由“属性”和“方法”两部分构成，属性描述对象的状态，方法则表示对属性的访问和操作。但是在 BACnet 标准中，BACnet 对象只由属性组成，不包含访问和操作属性的方法，访问和操作属性

的方法被定义为应用层服务（Application Service）这种互操作模式。

BACnet 标准对 BACnet 对象定义的表示方法中，每个 BACnet 对象定义都包括“属性名称”，“属性数据类型”和 O、W、R 之一的属性“说明标志”。其中：

1）O 表示属性在对象定义中是可选择的，应根据实际情况进行选用；

2）R 表示属性在对象定义中是必选的，并且是 BACnet 服务可读的；

3）W 表示属性在对象定义中是必选的，并且是 BACnet 服务可读、可写的。

在 BACnet 标准中，BACnet 标准对象的属性如下：

1）Object-Identifier（对象标识符）属性；

2）Object-Name（对象名称）属性；

3）Object-Type（对象类型）属性；

4）Present-Value（当前值）属性；

5）Description（描述）属性；

6）Device-Type（设备类型）属性；

7）Status-Flags（状态标志位）属性；

8）Event-State（事件状态）属性；

9）Reliability（可靠性）属性；

10）Out-Of-Service（脱离服务）属性；

11）Update-Interval（更新间隔）属性；

12）Unit（单位）属性；

13）Min-Pres-Value（最小值）属性；

14）Max-Pres-Value（最大值）属性；

15）Resolution（分辨率）属性；

16）COV-increase（COV 增量）属性；

17）Time_Delay（时间延迟）属性；

18）Notification-Class（通告类）属性；

19）High-Limit（高限值）属性；

20）Low-Limit（低限值）属性；

21）Deadband（限值宽度）属性；

22）Limit-Enable（限值使能）属性；

23）Event-Enable（事件使能）属性；

24）Acked-Transitions（状态变迁确认）属性；

25）Notify-Type（通告类型）属性。

5. BACnet 对象的特点和作用

不管是标准 BACnet 对象，还是非标准 BACnet 对象，为了使对象成为“BACnet 网络上可以标识寻址和可访问的”的实体要素，就要在对象中定义用于“可见标识”的属性项。注意这里标准对象和非标准对象的区别。标准对象是 BACnet 定义的最常用对象，是表示具体楼宇自控设备的基本元素，而实际具体的楼宇自控设备可以“映射”为不同的 BACnet 标准对象实例的组合。BACnet 标准规定所有对象定义均必须至少包含如下 3 个可见性的标识属性项：

1）Object-Identifier（对象标识符）：面向通信寻址的标识属性项；

2）Object-Name（对象名称）：面向人的可读性标识属性项；

3）Object-Type（对象类型）：面向互操作过程的标识属性项。

对象是楼宇自控设备的模型化和抽象化的描述，BACnet 对象为不同属性（Property）组成的

集合，BACnet 对象是 BACnet 协议中最为核心的内容，实质上就是一个由数据项组成的数据结构。对象的属性是楼宇自控设备互操作过程中所表现的外部特性的反映。

对于 BACnet 对象的特点和作用，一位学者给予了很精彩的叙述：

1）BACnet 对象主要用于描述楼宇自控设备互操作过程中所表现的外部互操作特性，不涉及楼宇自控设备的内部配置、内部结构和内部运行过程。

BACnet 对象表示楼宇自控设备状态、功能参数，还包含控制楼宇自控设备状态和功能的控制参数，这些参数集合就构成了对象的属性，这样的参数集合可以实现在 BACnet 网络环境中的互通信和可访问。BACnet 对象是描述楼宇自控设备“网络互通信和可访问”的信息模型，“网络互通信和可访问”是实现互操作的基础。

2）BACnet 对象是有关状态、功能和控制参数的集合，通过读、写两种方式实现对访问对象的操作。BACnet 应用层服务基本上是基于“读/写”操作的内容。BACnet 对象定义和使用，实现了网络互通信和可访问，使复杂的互操作行为简化为“读”和“写”两种基本的操作。

3）BACnet 对象很好地将互通信和互操作结合起来。互操作语义和过程分别由对象和应用层服务定义后，使用测控网络来实现 BACnet 对象的互通信过程。具体实现通信的测控网络内容非常丰富，并且能够不断地融入使用最新的通信网络和控制网络技术。

4）BACnet 对象使 BACnet 标准具有良好的扩展机制。BACnet 对象提供的扩展机制不仅是通信网络的扩展，而且本身也具有良好的扩展特性。由于 BACnet 对象实质上只是由多个数据项组成的数据结构，因此既可以很容易地按照对象的基本定义构造各种对象类型，也可以很容易地在已有标准 BACnet 对象中加入新的属性，从而在“继承”的基础上形成新的对象类型。

3.5.7　BACnet 标准的应用层服务

1. BACnet 应用层服务的分类

在 BACnet 标准中，把对象的方法称为服务，对象及其属性提供了对一个楼宇自控设备“网络可见信息”的抽象描述，而服务提供了如何访问和操作这些信息的命令和方法。BACnet 设备通过在网络中传递服务请求和服务应答报文实现服务。BACnet 定义了 35 种服务，并将其划分为 6 个类别：

（1）报警与事件服务（Alarm and Event Services）

包含 8 种服务，处理环境状态的变化，提供了 BACnet 设备预设的请求值改变通告、请求报警或事件状态摘要、发送报警或事件通知、收到报警通知确认等方法。

（2）文件访问服务（File Access Services）

包含 2 种服务，提供读写文件的方法，包括上/下载控制程序和数据库的能力。

（3）对象访问服务（Object Access Services）

包含 9 种服务，提供了读、修改和写属性值以及增删对象的方法。

（4）远程设备管理服务

包含 11 种服务，提供对 BACnet 设备进行维护和故障检测的工具、方法。

（5）虚拟终端服务（Virtual Terminal Services）

包含 3 种服务，提供了一种面向字符的数据双向交换机制，使其他具有专有特性的楼宇自控设备成为一个 BACnet 虚拟终端并使 BACnet 网络能对其进行重构。

（6）网络安全服务

包含 2 种服务，提供对等实体验证、数据源验证、操作者验证和数据加密等功能。BACnet 功能组规定了实现特定控制功能所需的对象和服务的组合。

BACnet 已定义了 13 个功能组，包括时钟功能组、事件响应功能组、文件功能组、虚拟终端功能组、设备通信功能组等。

BACnet 将系统中的每个物理点和软件值定义为一个“对象（Object）”。最常用的对象是“模拟输入”、“模拟输出”、“模拟值”、“数字输入”、“数字输出” 和“数字值”。所有对象都有与之关联的属性，如当前值、描述、状态、单位等。每个对象都有必备属性和可选属性。每种对象类型的相关要求和定义，在 BACnet 标准的附录 C 中有详细说明。

设计文件及相关系统图应该罗列出系统中要实现的每个物理连接，如同传统设计中的列表。这些列表应该包括与物理连接点相关的软件参数，如报警极限、设定值等。列表中的每一项，在 BACnet 系统中都被视为一个对象，该对象具有与之相关的属性。而且，每个对象的必备属性必须得到包含该对象的 BACnet 设备的支持。

当连接和集成两个以上的厂家提供的控制器时，对象非常重要的作用就会显现出来。如果 BAS 要与冷冻机上的 BACnet 控制器通信，应该首先确定要在冷冻机控制器和 BAS 之间传送的所有对象。严格确定和设计控制器将要收发的所有对象，可确保系统安装运行顺利实现。相关厂商也会根据系统设计中提出的对象要求，在它们产品的接口中提供相应的对象操作支持。当进行系统级集成时，也应该采取上述步骤和措施。

设计文件可能忽略可选属性的支持。在很多情况下，这样做是合适的，因为被忽略的可选属性并不需要。但是，如果控制功能的实现需要可选属性，则设计文件应将这些可选属性支持纳入每个对象类型的定义中。如果可选属性不是控制功能需要的，但系统中的 BACnet 设备却支持这些可选属性那也无妨，它们不会降低系统的性能。

2. BACnet 系统中的服务

服务是一个 BACnet 设备从另一个 BACnet 设备获得信息或命令另一个设备执行某种动作或通知一个或多个设备发生了某种事件的方法和手段。换句话说，服务控制了 BACnet 局域网中的活动，并保证报文和命令到达预定地点。一个服务可以从一个 BACnet 设备中读取一条信息，而另一个服务可以指示一个 BACnet 设备先关闭，然后再启动。

但是，如果一个 BACnet 设备支持某种服务而另一个设备却不支持这种服务，那么这两个设备就不能使用这种特定的服务进行相互通信。这一点可能很重要，也可能不重要，取决于何种服务不被支持。如果两个设备支持另一种可起到类似作用的服务，就可以使用共同支持的服务实现需要的通信功能。例如，一个设备可能支持“读多个属性”服务，而另一个设备可能不支持（读多个属性服务就是使用一条命令从一个设备中读取多个 BACnet 对象和属性）。一个设备可以通过多次发送“读属性”服务来实现“读多个属性”服务的功能。可是，由于多次重复“读属性”服务，BACnet 局域网上的通信活动会有所增加。

如果要求系统中的每个 BACnet 设备都支持所有的 BACnet 服务，那是不可能的。BACnet 标准对系统中所有部件，从操作站到控制器甚至智能传感器都进行了阐述。许多服务需要在高层网络实现，但在控制器这一层网络却不必实现这些服务。在底层网络实现某些服务直接关系到 CPU 处理能力和存储器的选择，因而直接影响到这些产品的成本。

大多数设计需要一个通用的方法，来确定系统每一种所需要的服务。这就是 BACnet 标准定义了 6 个通用的一致性等级的原因。每个一致性等级都有一个必须实现的最少的服务数量。

3. BACnet 系统中的专用服务与对象

BACnet 标准允许生产商定义自己专用的服务和对象，也就是说，各生产商在不影响 BACnet 标准通信功能的前提下，可以在自己生产的系统内增添特别功能。然而，当某种系统功能依赖专用服务和对象时，就意味着其他生产商不能启用这种功能。

系统设计者必须决定是否将专用服务和对象用于一个工程项目。如果将专用服务和对象用于

系统功能的实现，则设计文件应该要求专用服务和专用对象的提供者提交专用功能的设计文档，以便与其他生产商也能在系统中根据该文档实现该专用服务和对象，从而最终实现完全的系统集成。

4. BACnet 设备级别和设备等级说明

在实际的 BAS 中，没有必要也不可能所有的设备都支持、包含上述所有的对象和服务。因此，BACnet 定义了 6 个一致性类别（设备级别）。一致性类别的分级编号为 1～6，最低级别是类别 1。每个类别都规定了设备要实现的最小服务子集，且包含低级别的所有服务。

为了帮助用户和工程人员确定不同 BACnet 设备之间的互操作性，需要厂商为每个设备提供标准格式文件以标识设备中已实现的 BACnet 标准的内容，即文件需包括的设备符合 BACnet 等级的说明。这个文件就是 PICS（Protocol Implementation Conformance Statement，协议实现一致性声明），它包括：

1）标识厂商和描述设备的基本信息；
2）设备符合 BACnet 的级别；
3）设备所支持的功能组；
4）设备所支持的基于标准或专有的服务，设备启动或响应服务请求的能力；
5）设备所支持的基于标准或专有的对象类型及其属性描述；
6）设备支持的数据链路技术；
7）设备支持的分段请求和响应。

3.5.8 应用层协议时序图

对应用层的服务语义定义后，接下来就要对服务原语具体传递的过程及报文格式进行说明。服务原语具体传递的过程可以通过时序图来说明。每个时序图可以分为 3 个或者 4 个区域。标注为“提供方”的区域代表了服务提供者，标注为“用户”的区域代表了服务使用者。如果还存在第 4 个区域，则代表的是应用程序。其中位于“提供者”与“用户”之间的竖线，对于应用层而言，指的是 BACnet 用户元素与 BACnet 应用层服务元素之间的接口。对于下面各层而言，这些竖线表示的则是处于服务提供者与服务使用者之间的服务访问点（service-access-point）。在应用层协议时序图中，由上到下是时间流逝的方向。处于服务使用者区域中的箭头，指明了在事务处理过程中由服务原语所表示的信息的流动方向（即从服务使用者流入或流出）。

1. 证实与非证实服务报文时序图

图 3-20 给出了正常非证实报文的时序图，图 3-21 给出了非正常非证实服务报文的时序图。

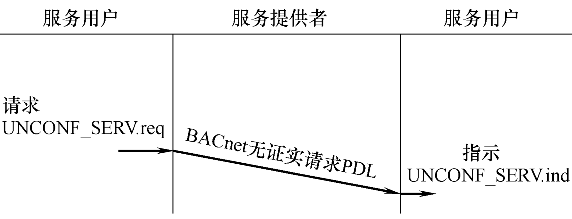


图 3-20 正常非证实报文的时序图

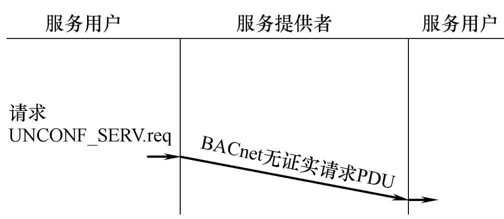


图 3-21 非正常非证实服务报文的时序图

对于非证实报文的服务，不论客户端所要求的服务是否能够正确执行，用到的报文格式就是 BACnet-Unconfirmed-Request-PDU（Type = 1）一种。对于出现差错的非正常无证实服务请求报文，被接受用户丢弃。

2. 正常有证实服务报文

（1）正常有证实服务报文（不分段）

BACnet 标准定义的证实服务所涉及的情况比非证实服务要复杂得多。在证实服务中，必须实现控制和管理与报文长度有关的“分段和重组”功能、流量控制以及分段报文差错检测与恢复功能。

证实服务经历“请求”、“指示”、“响应”和“证实”不同的阶段，因此要分别采用不同格式的报文，以满足不同阶段中的数据通信。如果证实服务所涉及的报文长度不分段，此时的证实服务的报文传输过程如图 3-22 所示。当响应为 Result（+）时，响应报文为 BACnet-SimpleACK-PDU（BACnet 简单确认 PDU）或 BACnet-ComplexACK-PDU（BACnet 复杂确认 PDU）；而当响应为 Result（-）时，响应报文为 BACnet-Error-PDU（BACnet 出错 PDU）。

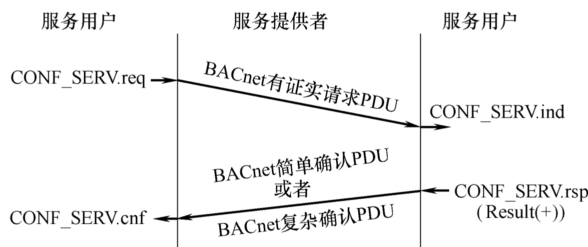


图 3-22　正常有证实服务（不分段）报文时序图

（2）正常有证实服务（有分段请求）报文

对证实型服务传输的报文出现报文长度超过网络层协议数据单元（NPDU）时，就必须对报文进行分段传输。如前所述，对于有证实请求（Confirmed-Request）和复杂确认（Complex-ACK）报文才可能需要分段。

报文分段遵循如下规则：

1）每一个报文尽可能只用一个 APDU 发送。

2）当一个报文的长度超过 APDU 的允许最大长度时，则应分段成最少个数的多个 APDU 发送。

3）对报文进行分段时，以 1B 作为最小分段（分割）单位。

对报文进行分段，还应注意 3 个方面：

1）APDU 最大长度还与信源节点设备的发送缓冲区大小有关。不同 BACnet 设备发送缓冲区大小可以不同，但不能小于 50B。

2）BACnet 互联网中各网段所能传输 APDU 的最大长度不是一个常数。此时的长度由本地、远程以及中间传输网络的网络层协议数据单元（NPDU）最大长度所决定。

3）远程信宿设备节点接收 APDU 的最大长度不能小于 50B，即信宿设备节点的接收缓冲区最小长度必须大于 50B。

正常有证实服务（有分段请求）报文时序图如图 3-23 所示。

从图 3-23 中知道，一个交换是使用有证实的服务请求、指示、响应以及证实。有些请求需要分段，因此需要使用几个 CONF_SERV. request 原语来传递整个请求。分段确认服务原语是另一个独立的交换，它用来通知客户，服务器已准备接收下一分段了。

（3）其他的正常有证实服务的报文时序图

1）正常有证实服务（有分段响应）的报文时序图如图 3-24 所示。

2）具有应用程序流程控制的正常有证实服务时序图如图 3-25 所示。

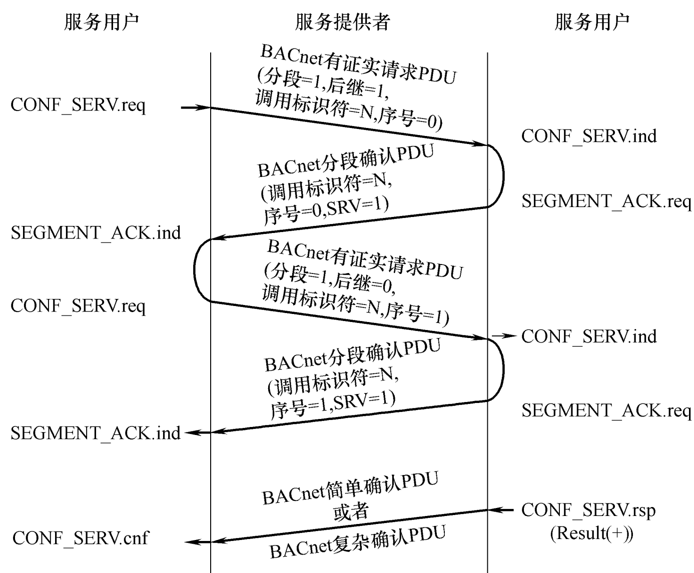


图 3-23　正常有证实服务（有分段请求）报文时序图

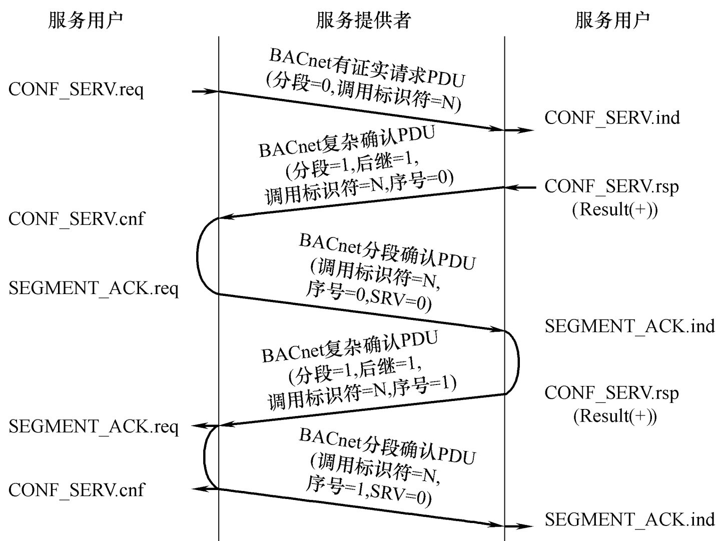


图 3-24　正常有证实服务（有分段响应）的报文时序图

3）具有分段请求、应用程序流程控制和取消响应的正常有证实服务时序图如图 3-26 所示。

4）几种情况下非正常有证实服务的时序图如下：

有分段的响应和请求方中止的非正常有证实服务时序图如图 3-27 所示。

不分段，有服务误差发生情况下的非正常有证实服务时序图和协议差错发生的有证实服务时序图分别为图 3-28 和图 3-29 所示。

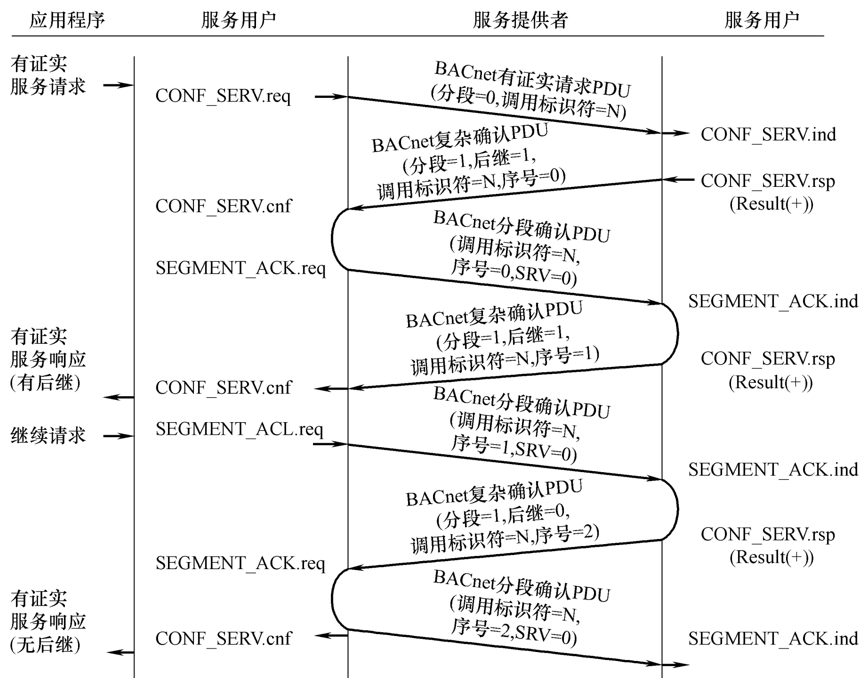


图 3-25　具有应用程序流程控制的正常有证实服务时序图

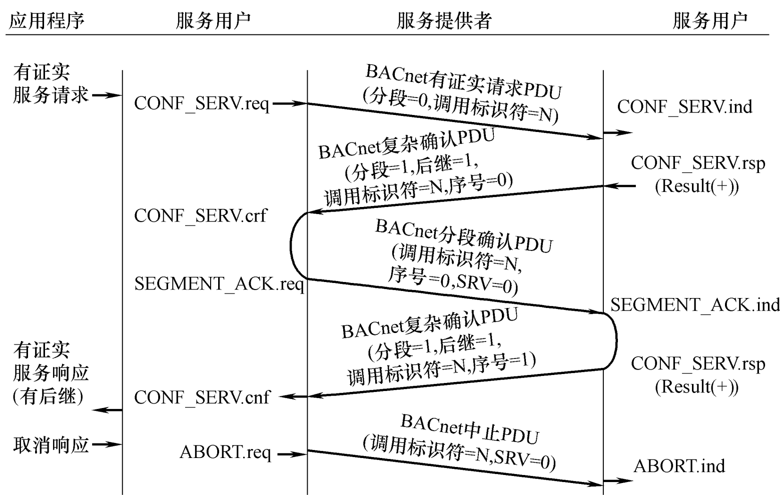


图 3-26　具有分段请求、应用程序流程控制和取消响应的正常有证实服务时序图

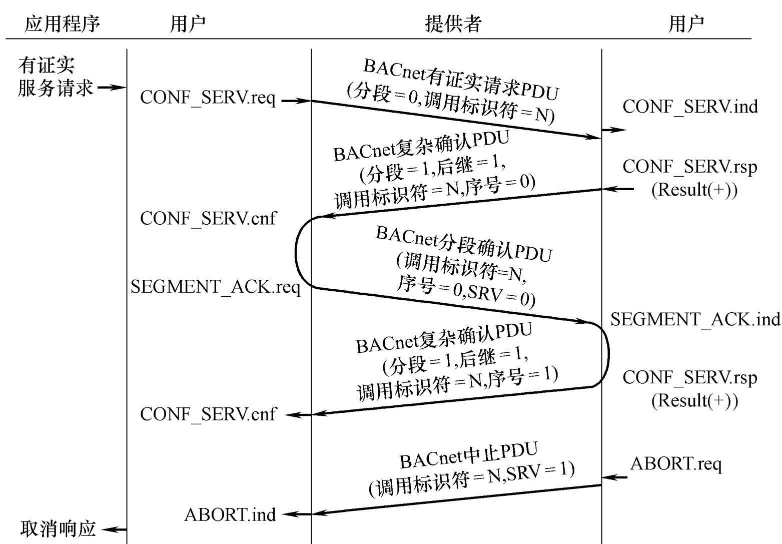


图 3-27　非正常有证实服务时序图

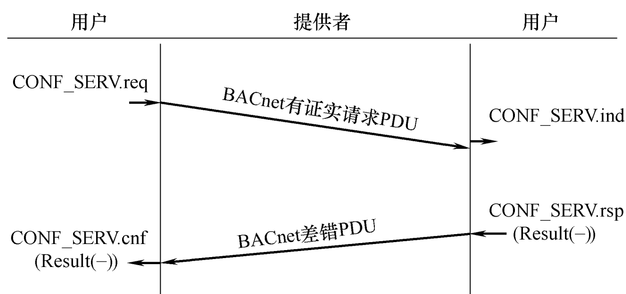


图 3-28　非正常有证实服务（不分段和有差错发生）时序图

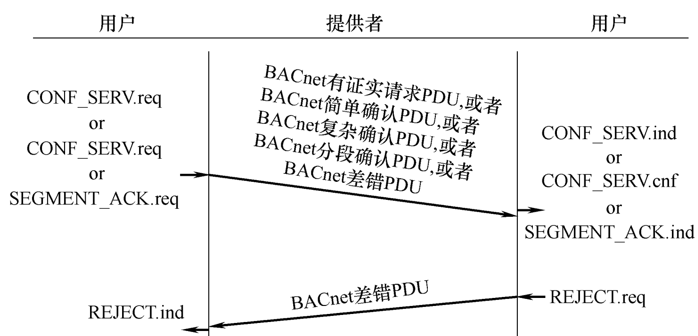


图 3-29　具有协议错误的非正常有证实服务请求或相应时序图

第 4 章　BACnet 的网络层、物理层和数据链路层

4.1　BACnet 网络层功能及对网络层的说明

4.1.1　BACnet 网络层功能

一般情况下，BACnet 应用系统中的管理层网络使用 TCP/IP 网络，而在现场控制器层，处于测控网络的属性要求，可以采用基于令牌控制的 ARCnet 网络、MS/TP 网络、LonWorks 网络、PTP 网络、以太网或虚拟以太网等。在 BACnet 网络体系结构中，网络层是一个承上启下的协议中间层，从协议的观点看，网络层的功能是向应用层提供统一的网络服务平台，屏蔽异构网络的差异，实现各种局域网络互联和报文路由等功能。BACnet 网络层协议负责建立和维护路由表，实现在 BACnet 网络中的路由器自动配置和报文在路由器之间的流动能够顺畅进行。

换言之，网络层的功能就是实现连接两个异构的 BACnet 局域网。实现异构网络连接的设备称为“BACnet 路由器”。数据链路层提供将报文在本局域网内单播到某个设备或广播到所有设备，网络层提供将报文直接传递到一个远程的 BACnet 设备、广播到一个远程 BACnet 网络或者广播到所有的 BACnet 网络中的所有 BACnet 设备的能力。一个 BACnet 设备由一个特定的网络号和一个确切的 MAC 地址惟一标识。网络层提供网络路由功能，使得报文可以被直接传递到一个远程设备、一个远程网络上的所有设备或者所有网络上的所有设备。由于 BACnet 协议规定两个 BACnet 设备之间只能有一条有效路径，这个限制大幅度降低了网络层的复杂性，简化了路由算法。

在前面讲述的 BACnet 互联网络的拓扑结构组成中，使用路由器将两个 BACnet 网络实现互联，BACnet 路由器有两种，还有一种由于在与 IP 网络的互联中很少使用半路由器，本书不再加以赘述。

BACnet 设备之间通过网络通信。常见网络包含 IP（BACnet/IP）、主从令牌传递网络（BACnet MS/TP）。BACnet 网络的互联需要一个 BACnet 路由器，当连接一个非 BACnet 网络和一个 BACnet 网络时需要网关。当使用以太网来进行网络通信时，BAS Remote 提供一种方便的方法来扩展现场 BAS，此时 BAS 路由器可作为 BACnet 应用特殊控制器（B-ASC）。除了通用 I/O 点，它也可以作为 BACnet/IP 和 ModBus 远程 I/O 以及 ModBus 至 BACnet 的网关以及一个 Sedona Framework 控制器。

4.1.2　BACnet 网络层与 TCP/IP 网络层的区别

1. TCP/IP 模型

TCP/IP 模型被广泛应用于构建各种规模的局域网、城域网和广域网。TCP/IP 协议簇使任何具有网络设备的用户都能访问和共享 Internet 上的信息，其中最重要的协议是传输控制协议（TCP）和网际协议（IP）。TCP 和 IP 是两个独立且紧密结合的协议，负责管理和引导数据报文在 Internet 上的传输。两者使用专门的报文头定义每个报文的内容。TCP 负责和远程主机的连接，IP 负责寻址，使报文被送到信宿节点。

TCP/IP 模型和 OSI 模型关系如图 4-1 所示。

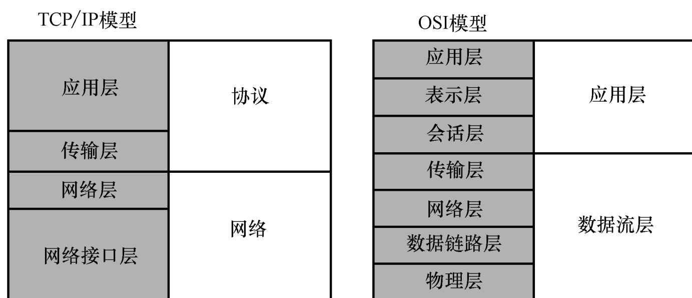


图 4-1　TCP/IP 模型和 OSI 模型关系

在 TCP/IP 模型中，网络接口层是 TCP/IP 模型的最底层，负责接收从网络层来的 IP 数据报并将 IP 数据报通过底层物理网络发送出去，或者从底层物理网络上接收物理帧，抽出 IP 数据报，交给网络层。网络接口层使采用不同技术和网络硬件的网络之间能够互联，它包括属于操作系统的设备驱动器和计算机网络接口卡，以处理具体的硬件物理接口。

网络层负责独立地将分组从源主机送往目的主机，涉及为分组提供最佳路径的选择和交换功能，并使这一过程与它们所经过的路径和网络无关。TCP/IP 模型的网络层在功能上非常类似于 OSI 参考模型中的网络层，即检查网络拓扑结构，以决定传输报文的最佳路由。

传输层的作用是在源节点和目的节点的两个对等实体间提供可靠的端到端数据通信。为保证数据传输的可靠性，传输层协议也提供了确认、差错控制和流量控制等机制。传输层从应用层接收数据，并且在必要的时候把它分成较小的单元，传递给网络层，并确保到达对方的各段信息正确无误。

应用层涉及为用户提供网络应用，并为这些应用提供网络支撑服务，把用户的数据发送到低层，为应用程序提供网络接口。由于 TCP/IP 将所有与应用相关的内容都归为一层，所以在应用层要处理高层协议、数据表达和对话控制等任务。

在 TCP 的应用层中，将数据称为“数据流（stream）”而在用户数据报协议（UDP）的应用层中，则将数据称为“报文（message）”。TCP 将它的数据结构称作“段（segment）”，而 UDP 将它的数据结构称作“分组（packet）”；网间层则将所有数据看作是一个块，称为“数据报（datagram）”。TCP/IP 使用很多种不同类型的底层网络，每一种都用不同的术语定义它传输的数据，大多数网络将传输的数据称为“分组”或“帧（frame）”。

2. TCP/IP 网络模型数据封装

在 TCP/IP 网络模型中，如图 4-2 所示，网络必须执行以下 5 个转换步骤以完成数据封装的过程。

（1）生成数据

当用户发送一个电子邮件信息时，它的字母或数字字符被转换成可以通过互联网传输的数据。

（2）将端到端的传输数据打包

通过对数据打包来实现互联网的传输。通过使用段传输功能确保在两端的信息主机的电子邮件系统之间进行可靠的通信。

（3）附加目的网络地址

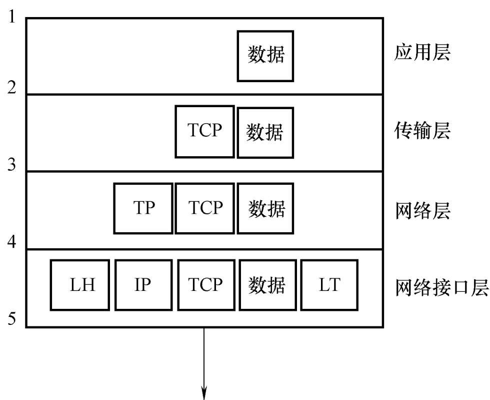


图 4-2　TCP/IP 模型数据封装

在报头上，数据被放置在一个分组或者数据报中，其中包含了带有源和目的逻辑地址的网络报头，这些地址有助于网络设备在动态选定的路径上发送这些分组。

(4) 附加目的数据链路层地址（MAC 地址）到数据链路报头

每一个网络设备必须将分组放置在帧中，该帧的报头包括在路径中下一台直接相连设备的物理地址。

(5) 传输比特流

帧必须被转换成一种 1 和 0 的模式，才能在介质上（通常为线缆）进行传输。时钟功能使得设备可以区分这些在介质上传输的位，物理互联网络上的介质可能随着使用的不同路径而有所不同。例如，电子邮件信息可以起源于一个局域网，通过校园骨干网然后到达广域网链路，直到到达另一个远端局域网上的目的主机为止。

3. BACnet 网络层与 ISO-RM 网络层的比较

BACnet 采用 4 层级的体系结构，主要目的就是组成系统时最大限度地节省系统软件和硬件的开销，因此与 ISO-RM 网络层相比，BACnet 网络层功能是极为简单的。OSI-RM 网络层的作用是互联各种不同的网络，屏蔽不同网络拓扑结构和通信介质的差异，能够实现数据分组传输过程中的路由选择及优化路由选择；能够进行中继、网络流量控制、网络连接等相关过程的管理，这就导致 OSI-RM 网络层功能实现技术非常复杂。而 BACnet 标准考虑到楼宇自控网络可靠性和实时性及运行效率，并根据 BACnet 网络的特点，对 ISO-RM 网络层功能进行了简化。

BACnet 标准的网络层主要完成地址解释、路由、协调异种底层网络差异的功能，但 BACnet 网络中的路由算法优化处理过程比 ISO-RM 网络层的同类过程要简单得多。在楼宇自控网络中，各种楼宇自控设备在安装完毕后，自控网络的通信节点也就随之确定，出现变动的几率是较低的，这样一来，楼宇自控网络的拓扑结构就是被固定在一种状态中，网络节点的位置固定，加上楼宇自控网络节点相对 TCP/IP 网络来说数量要少得多，一个大型 BAS 的监控点数仅仅才数千个，而且若干个这样的监控点与附近的控制器组成一个能够实现协议通信的控制节点，也就是说，在楼宇自控网络中，网络的通信节点数量不是很多。BACnet 标准为了更加简化路由算法，规定网络中任意两个节点之间只能有一条报文传输路径，不能形成环路，因而 BACnet 网络一般为树形拓扑结构。由于以上原因，BACnet 网络作为楼宇自控网络，协议通信过程中的路由算法也就变得很简单了。

BAS 是工控系统在建筑领域中的延伸，工控系统和 BAS 工作依托的测控网络都有这样的特点：网络节点间的通信一般是测控信息和指令的集合，这些测控信息和指令都是小数据量的信息，楼宇自控设备间交换的数据信息字节少，出现报文分段的情况很少。对 BACnet 报文分段是 BACnet 网络的应用层功能，因此网络层不再涉及报文分段及相关的管理，因此网络层的功能进一步简化。BACnet 网络层功能简化具体体现在网络层处理和传输的 BACnet 报文最大长度仅仅取决于网络层下层连接的不同局域网传输报文长度中的最小报文长度。

考虑组建 BACnet 应用系统的基本网络环境中越来越多地使用 BACnet/IP 网络，BACnet 网络层允许的最大报文长度见表 4-1。

表 4-1　BACnet 网络层允许的最大报文长度

局　域　网	报文最大长度/B	局　域　网	报文最大长度/B
ISO 8802-3(以太网)	1497	PTP(点对点)网络	501
ARCnet 网络	501	LonWorks 网络	228
MS/TP(主从/令牌)网	501	BACnet/IP 网络	1497
VLAN	视具体网络而定		

通过比较知道，根据楼宇自控网络的特点，BACnet 标准定义的网络层功能同 OSI 模型的网络层功能相比，极大地得到了简化，因此也就极大地减小了 BACnet 网络在网络层处理报文及相关过程的软硬件开销，避免了直接使用 ISO-RM 模型网络层和 TCP/IP 模型网络层复杂的报文处理过程，但又完全能够满足楼宇自控网络的要求，效能得到提高。

对于 BACnet 网络来讲，也是采用路由器来实现 BACnet 网络互联的，当然这里的路由器指的是 BACnet 路由器。由网络层实现的报文传输分为“单播”方式和“广播”方式。其中“广播”方式又分为“本地广播”、“远程广播”和“全局广播”三种。传输报文的信源节点和接收报文的信宿节点同在一个 BACnet 子网内，这样的广播传送就是本地广播传送，本地广播传送是不需要路由器进行的；如果传输报文的信源节点和接收报文的信宿节点不在同一个 BACnet 子网内，报文的传送要通过路由器进行，这样的广播传送方式是“远程广播”传送；全局广播是报文的信源节点对 BACnet 互联网络内所有其他节点进行的广播传送方式。

BACnet 使用多播地址和广播地址来支持多个信宿节点的报文传输。多播是指一个报文被传送给一组目标设备，即组播。BACnet 网络层处理两种报文：一种是包含有应用层协议数据单元（APDU）的数据报文；另一种是关于网络层本身控制信息的网络层协议报文。对于数据报文，只有 BACnet 非证实请求协议数据单元（BACnet-Unconfirmed-Request-PDU）的报文可以被多播或广播。而网络层协议报文都可以被多播或广播，使用多播地址或者广播地址进行。

4.2　BACnet 网络层服务与 PDU 结构

4.2.1　BACnet 网络层服务

1. BACnet 网络层实现数据交互服务原语

BACnet 网络层向应用层提供的服务是不确认的无连接形式的数据单元传送服务，而应用层定义了可靠性传输的“证实服务”，这就避免了功能重复，简化了网络层的报文处理过程，网络层所有服务均为“无证实服务”类型。

与网络层实现数据交互相关的原语是 N-UNITDATA 请求和指示，原语及参数如下：

N-UNITDATA. request（destination_address，data，network_priority，data_expecting_reply）

N-UNITDATA. indication（source_address，destination_address，data，network_priority，data_expecting_reply）

N-UNITDATA. request：	网络层服务请求原语
Destination_addres：	目的地址，是可选项
Data：	由应用层协议数据单元（APDU）组成
network_priority：	网络优先权
data_expecting_reply：	数据回复标志
N-UNITDATA. indication：	网络层服务指示原语
soruce_address：	源地址

2. “目标地址”和“源地址”的组成

网络层实现数据交互相关的原语中有“目标地址”和“源地址”参数。“目标地址”和“源地址”均包括 3 个组成部分：网络号、MAC 地址和链路服务访问点。

（1）网络号

每一个 BACnet 子网络都有一个惟一的 16 位无符号整数标识符作为该 BACnet 子网的网络号，取值范围为 1 ~ 65534，0 为保留值，65535（X’FFFF’）专用于进行全局广播传输报文时的信宿

节点地址。两个或多个 BACnet 子网络通过路由器互联构成 BACnet 互联网。BACnet 子网络内部的数据通信既不需要使用路由器，也不需要使用网络号，即报文进行本地广播时，已省略网络号。

（2）适合于下层局域网技术的 MAC 地址

BACnet 网络层下面可以连接各种不同的局域网，而不同的局域网又有彼此不同的物理地址（MAC 地址）表示方法。如某以太网中的工作站 MAC 地址 00-E0-4C-54-54-E9，某楼控系统中的 MS/TP 网络中使用的 MAC 地址仅用 1B 表示。

（3）链路服务访问点

链接服务访问点用于网络层实体（NE）DLUNITDATA. request 请求。

网络号码 X‘FFFF’表示此报文广播到目前能够到达的所有网络的所有设备。目前能够到达的网络是指那些在 BACnet 互联网中已经具有一条有效连接的网络。“数据”参数是从应用层传递过来的 NSDU，其中包含一个完全编码的 BACnet APDU。“网络优先级”参数是一个数字值，由 BACnet 路由器中的网络层用来确定任何可能的优先于先进先出排队等待规则的情况。“data_expecting_reply”参数指出对于正在传送的数据单元是否期待有一个应答的数据单元。

当网络层从应用层收到一个 N-UNITDATA. request 请求原语后，就用网络层规范所表述的方式产生并发送一个 NSDU。当一个 BACnet 网络实体收到另一个 BACnet 网络实体发来的 NSDU 后，处理过程如下：

1）如果信源节点和信宿节点中间有一个直接连接的网络，则直接将 NSDU 发送到目的地。

2）信源节点和信宿节点中间没有直接连接的网络，这是要将 NSDU 发送到下一个 BACnet 路由器后再路由到目的地。

3）如果 NSDU 的地址与它自己的应用层中的某个实体的地址匹配，则向这个实体发送一个 N-UNITDATA. indication 原语，通知有一个 NSDU 到达。

4.2.2　BACnet 网络层 PDU 结构

1. BACnet 网络层协议数据单元结构

BACnet 网络层采用了与应用层不同的方式，只定义了 NPDU 报文，为了实现不同功能的网络层服务，通过报文头部 PCI 编码区的给定标识信息进行功能控制和管理。BACnet NPDU 的组成结构以及报文头部 PCI 编码区的控制管理功能标识域如图 4-3 所示。

版本	1B
控制	1B
DNET	2B
DLEN	1B
DADR	可变字节
SNET	2B
SLEN	1B
SADR	可变字节
Hop Count	1B
网络层报文类型	1B
Vendor ID	2B
NDU	NB

图 4-3　BACnet NPDU 结构

2. 协议版本号

每个 NPDU 的第一个字节是一个无符号整数，标识 BACnet 协议的版本号。目前的 BACnet 协议的版本号是 1。

3. NPDU 中的控制字段

NPDU 的第二个字节是控制字段，该字段的作用是区分服务的类型和功能，8bit 中的每一位布尔值用来表示不同的功能，控制字节中每个位标识的作用见表 4-2。

4. 特殊域的内容

1）DNET：信宿节点网络号，2B。

2）DLEN：信宿节点的 MAC 层地址的长度，1B，0 表示对目标网络的广播。

3）DADR：信宿节点的 MAC 层地址。

4）SNET：信源节点网络号，2B。

5）SLEN：信源节点 MAC 层地址的长度，1B。

表 4-2　控制字段中每个位标识的作用

位	意　义	比特值	比特值的含义
第 7 位	标志报文类型	0	表示 NPDU 传送的是一个包含 BACnet APDU 的数据报文，报文类型域不存在
		1	表示 NPDU 传送的是一个网络层报文，报文类型域存在
第 6 位	保留	0	目前置 0
第 5 位	目标指示器（目标地址说明）	0	DNET、DLEN、DADR、Hop Count 域不存在
		1	DNET、DLEN、Hop Count 域存在 DLEN = 0 表示广播 MAC DADR 不存在表示远程广播报文 DLEN > 0 规定了 DADR 域的长度
第 4 位	保留	0	目前置 0
第 3 位	源指示器（源地址说明）	0	SNET、SLEN、SADR 不存在
		1	SNET、SLEN、SADR 域存在 当 SLEN = 0 时，属于无效报文 SLEN > 0 规定；SLEN 表示 SADR 域的长度
第 2 位	与 N-UNITDATA 原语中的 data_expecting_reply 参数一致	0	存在一个网络层报文期待的应答（除 BACnet-Confirmed-Request-PDU、BACnet-ComlexACK-PDU 段外）。
		1	存在一个 BACnet-Confirmed-Request-PDU、一个 BACnet-ComlexACK-PDU 段或者一个网络层报文期待的应答
第 1 位，第 0 位	表示路由器节点网络层实体对报文处理的优先级	11	关于楼宇安全性的报文
		10	关于楼宇关键设备的报文
		01	紧急报文
		00	一般报文

6）SADR：信源节点的 MAC 层地址。

7）Hop Count：递减计数器值，1B，初始化为 X‘FF’。用于记录报文经过 BACnet 路由器的次数。报文每经过一个 BACnet 路由器，该域的数值就减 1。当该值为 0 时，则丢弃这个报文，不再向下一个路由器转发。

5. 网络层报文类型（Message Type）

如果控制域字节中的第 7 位为 1，表示此报文是一个网络层报文，其报文类型域存在。这是个 1B 的域，其内容表示报文携带的各种网络层的控制信息。

6. NUD（网络层数据部分）

NPDU 中网络层数据部分 NUD 域的内容和长度取决于报文的类别。当网络层报文为传送 APDU 报文时，该域必须进行标识。如果报文是网络层协议控制和管理报文，NUD 域内容和长度由报文的类型（Message Type）确定。

如果信源节点和信宿节点同在一个 BACnet 子网内进行数据通信，NPDU 中与地址有关的域均可以默认。如果信源节点和信宿节点不在同在一个 BACnet 子网内，NPDU 报文经过一个或多个 BACnet 路由器转发报文，涉及源地址的相关域较为复杂。

4.3　网络层协议报文和运行规程

4.3.1　网络层协议报文

网络层协议报文是指 BACnet 网络层控制和管理报文，主要用于 BACnet 路由器配置和管理、

路由表的维护、网络层拥塞控制、PTP 链路控制和管理以及网络层功能查询等。有 10 种网络层协议报文，说明如下：

1. Who-Is-Router-To-Network 报文

该报文类型域是 X‘00’，有 2B 的网络号，并可由网络中任意节点产生，用广播方式发送和转发。Who-Is-Router-To-Network 报文作用：

1）转发节点用来确定通达信宿节点所在网络的下一个路由器。

2）帮助路由器更新路由表。在没有网络号的情况下，接收此报文的路由器要返回其所有可通达的目标网络的列表。

2. I-Am-Router-To-Network 报文

该报文类型域是 X‘01’，后面有 2B 的网络号。作用是列出通过发送此报文的路由器可以到达的网络号。

3. I-Could-Be-Router-To-Network 报文

此类报文类型域是 X‘02’，后面有 2B 的网络号。该类型报文是 BACnet 半路由器对数据部分有 DNET 域的 Who-Is-Router-To-Network 报文进行回复的报文，由能够建立到达特定目标网络的点到点连接的半路由器使用，其网络号就是所响应的报文中包含的特定网络的网络号。

4. Reject-Message-To-Network 报文

报文类型域是 X‘03’，后面有 1B 的原因说明和 2B 的网络号。该类报文由 BACnet 路由器产生，作用是一个拒绝报文，直接发给生成被拒绝的报文的节点，网络号就是被拒绝报文中的网络号。

5. Router-Busy-To-Network 报文

报文类型域是 X‘04’，后面是可选择的 2B 的网络号。该报文由路由器产生，作用是通过路由器通知停止接收通过本路由器向某特定目标网络或者所有网络发送的报文。此报文通常用广播 MAC 地址发向相应的网络。如果没有可选择的 2B 的网络号，则表示到所有网络的报文都不接收。

6. Router-Available-To-Network 报文

报文类型域是 X‘05’，后面是可选择的 2B 的网络号。该报文由路由器产生，并以广播方式进行传输，用户数据部分为 DNET 列表，说明该路由器恢复或使能接收来自 DNET 列表网络的报文。当数据部分的“DNET 表”默认时，表示该路由器恢复或使能来自所有网络的报文。

7. Initialize-Router-Table 报文

报文类型域是 X‘06’，作用是初始化一个路由器的路由表或者查询当前路由表的内容。此报文有一个数据段，包含有初始化路由表的信息。

8. Initialize-Router-Table-Ack 报文

报文类型域是 X‘07’，作用是对初始化路由表报文应答，表示路由器的路由表已经改变，或者已被查询。此报文的数据段具有与它应答的初始化路由表报文相同的格式。

9. Establish-Connection-To-Network 报文

报文类型域是 X‘08’，后面有 2B 的网络号和 1B 的“中止时间值”。作用是命令一个半路由器创建一个通达指定网络的点到点连接。

10. Disconnect-Connection-To-Network 报文

报文类型域是 X‘09’，后面有 2B 的网络号。作用是命令一个路由器释放所建立的点到点连接。

4.3.2　网络层协议运行规程

BACnet 路由器和 BACnet 设备节点进行的数据通信分为本地和远程通信，“本地”通信是指

信源节点和信宿节点在同一个 BACnet 网络中的通信，“远程”通信是指信源节点和信宿节点分处不同的 BACnet 网络之中。不管是“本地”通信也好，还是“远程”通信，都要遵循网络层协议运行规程。

1. 本地数据发送和接收的网络层协议规程

（1）本地数据发送的网络层协议规程

当网络层实体收到来自应用层的一个 N-UNITDATA. request 原语时，它先检查“目标地址”参数中的 DNET 字段。如果不存在此字段，表明信宿节点设备与信源节点设备位于同一个 BACnet 网络中。并根据“network-priority”参数构造一个 DNET 域、DADR 域、HOP COUNT 域、SNET 域和 SADR 域均不存在的 Control 域的控制字节。再将该控制字节与在 N-UNITDATA. request 原语中传递来的“data”参数组合并发送一个 NPDU 报文，发出相应的 DL-UNITDATA. request 原语。

（2）接收本地数据的网络层协议规程

当网络层实体收到来自数据链路层的一个 NPDU 时，在验证第 1 个字节的版本号后，接着检查第 2 个字节（Control 域）的最高位（第 7 位），来判断 NPDU 报文类别。不同类别的报文按如下方式进行处理。如果 Control 域字节的第 7 位是“0”，表示此报文中包含有 APDU。Control 域字节的第 7 位是“1”，表明此报文是网络层报文。

1）对于 APDU 报文，当不存在 DNET 域或者存在 DNET 域而同时包含有全球广播地址 X‘FFFF’时，网络实体查找 BACnet 应用层实体。如果网络实体找到相应的应用层实体，就将来自于数据链路层的报文中的 NPCI 部分去掉，将其后作为“数据”参数的部分作为一个 N-UNITDATA. indication 原语传送给应用层实体。如果网络层实体不能找到相应的应用层实体并且网络层实体本身位于非路由器节点，则丢弃此报文。当存在 DNET 域且不是全球广播地址 X‘FFFF’时，非路由器节点中的网络层实体丢弃此报文，路由器中的网络层实体的行为在后面介绍。

2）对于本地网络层报文，当不存在 DNET 域或者存在 DNET 域而同时包含有全球广播地址 X‘FFFF’时，网络层实体解读此报文。如果报文不可解读，就向源设备发送一个 Reject-Message-To-Network 报文。当存在 DNET 域且不是全球广播地址 X‘FFFF’时，非路由器节点中的网络层实体丢弃此报文。

2. 远程数据发送的网络层协议规程

当网络层实体收到来自应用层的一个 N-UNITDATA. request 原语时，首先检查“目标地址”参数中的 DNET 字段。如果存在此字段，表明信宿节点设备和信源节点设备在不同的 BACnet 网络中，必须通过 BACnet 路由器实现通信。在 NPCI 控制字节中指明存在 DNET、DADR、Hop Count 域，但是不存在 SNET 和 SADR 域。在“网络优先级”域中，网络层实体填入提供的参数。接着填写相应的地址域。NPCI 加在 N-UNITDATA. request 原语中的“数据”参数（就是 NSDU）的前面，形成 NPDU，传送给数据链路层，作为数据链路层原语中的“数据”参数。同时向数据链路层发送一个 DL-UNITDATA 数据链路请求原语。

对于某个特定的 DNET，有以下 4 种建立相应 BACnet 路由器地址的方法：

1）用人工方式设定。

2）发送一个 Who-Is 请求报文，并且读取应答的 I-Am 报文中的“源地址”SA 段而得到 BACnet 路由器地址。

3）使用网络层报文 Who-Is-Router-To-Network 来获得。

4）向一个远程 DNET 上的设备发送具有本地广播 MAC 地址的报文，然后读取远程设备的响应报文中的 SA 而获得。

3. 接收远程数据的网络层协议规程

当网络层实体接收到来自数据链路层的一个 DL-UNITDATA. indication 原语时，将该原语的“data”参数部分作为一个 NPDU，然后检查第二个字节，这是控制 NPCI。对于非路由器的 BACnet 设备中的网络层实体，如果发现此字节表示存在 DNET 域且其值不为 X‘FFFF’，则丢弃此报文。如果 NPCI 的 Control 字节表明存在 DNET 域，同时网络实体属于 BACnet 路由器，则网络实体把 NPDU 按优先级次序放入一个报文队列或多个队列（按优先级分）中，并按照队列顺序进行转发报文。如果 NPCI 的 Control 字节表示 NPDU 包含一个网络层报文，则网络层实体还需进一步查看“报文类型”域。如果此域表示存在一个 Reject-Message-To-Network 报文，则网络层实体要执行专门的针对此报文的规程。如果存在 SNET 和 SADR 域，表示报文来自一个对等的路由器；不存在 SNET 和 SADR 域则表示报文来自于与路由器直接连接的网络。对于后一种情况，路由器根据路由表所示的报文来自网络的网络号，将 SNET 和 SADR 添加到 NPCI 中。SADR 域设置成等于到达报文的 SA。

BACnet 路由器和要转发报文的网络连接情况分为：

1）收到报文的路由器直接与 DNET 所指示的网络相连接。这种情况的应对措施是：网络层实体去掉 NPCI 中的 DNET、DADR 和 Hop Count 域，将 DA 设置为等于 DADR，然后将报文直接发送给目标设备。

2）收到报文的路由器不直接与 DNET 所指示的网络相连接。网络层实体先将报文的 Hop Count 域的值减 1，如果此值仍然大于 0，就将报文沿着目标网络方向传给下一站路由器。如果不知道下一站路由器的位置，就发送一个 Who-Is-Router-To-Network 报文来确定其位置。如果 Hop Count 域值为 0，则丢弃此报文。

3）DNET 表示的是全球广播网络号并且 Hop Count 域的值大于 0，收到报文的路由器使用适合于每种数据链路的广播地址，向除了报文来自于网络以外的所有连接的网络广播此报文。如果 Hop Count 域的值为 0，则丢弃此报文。

4.4　BACnet 路由器

BACnet 路由器可以将两个或多个 BACnet 网络互联起来，构成一个 BACnet 互联网络，是建构 BACnet 网络的关键设备。BACnet 路由器使用 BACnet 网络层协议报文来维护路由表。BACnet 网络层协议数据单元中含有以下信息：

1）版本：表示当前 BACnet 协议的版本号；

2）控制：含有 BACnet NPDU 的控制信息；

3）DNET：目标网络号；

4）DLEN：目标 MAC 层地址长度；

5）DADR：目标 MAC 层地址；

6）SNET：源网络号；

7）SLEN：源 MAC 层地址长度；

8）SADR：源 MAC 层地址；

9）Hop Count：转发计数；

10）报文类型：指明网络层报文类型；

11）Vendor ID：生产商标识；

12）NSDU：网络层服务数据单元。

在“控制”域中，BACnet 规定了 4 种优先级不同的网络层报文，优先级由高到低分别为：

1）生命安全报文；

2）关键设备报文；

3）紧急报文；

4）正常报文。

不同优先级的 BACnet 网络层报文表示了数据通信的紧急程度，BACnet 路由器要按照优先级的高低次序处理 BACnet 网络层报文。一旦路由器接收到高优先级报文，必须要保证优先处理，并且为此要不惜丢弃一些低优先级报文。在通常的应用状况下，大部分 BACnet 网络层报文是正常报文，生命安全报文、关键设备报文和紧急报文等高优先级报文虽然占少数，但是必须得到及时处理。

BACnet 路由器作为实现 BACnet 网络互联的节点设备，可以为专用节点，也可以与其他节点共用一个网络节点。前者可以不实现 BACnet 应用层协议功能，只实现网络层协议功能。

BACnet 路由器作为一个 BACnet 设备，支持 Device 对象，支持对 Who-Is-Router-To-Network 报文、I-Am-Router-To-Network 报文、Who-Has 报文和 I-Have 报文的处理，支持对读属性、读多个属性、写属性和写多个属性服务的处理，因此需要实现对报文网络层、应用层的处理。

4.4.1　路由表和路由表的管理方式

1. 路由表

路由器均通过“端口”与 BACnet 子网络相互连接。路由器报文路由的功能是通过描述端口及其互连子网络之间关系的数据结构——路由表实现的。在 BACnet 互联网络中，路由器的每一个端口与一个 BACnet 子网络相连，并分配一个相应子网类型的 MAC 地址。路由表中反映端口连接子网络的运行状态，BACnet 标准的路由表由“端口表”组成。其中每一个端口表项包括下面的重要信息项：

1）端口的 MAC 地址，所占字节数与 MAC 地址长度相等。

2）与该端口直接相连的 BACnet 网络的网络号，占用 2B。

3）通过此端口可通达网络的网络号列表每个这些网络的可通达的状态。

2. 路由表的管理方式

路由表的管理采取如下的方式：

1）启动时，向每个端口广播一个 I-Am-Router-To-Network 报文，其中包含有每个可通达网络的网络号。同时还广播发送 Who-Is-Router-to-Network 报文、I-Am-Router-To-Network 报文，并清空 Router. ini 文件的［RouterTable］段里面的路由表。

2）当收到别的路由器广播的 I-Am-Router-To-Network 报文时，在路由表中填上网络号、端口 ID 和端口信息，端口信息即为该路由器的 IP 地址。

3）当收到 Initialize-Routing-Table 报文时，分为添加记录、修改记录、删除记录和直接回复 4 种情况进行处理。

4.4.2　路由器的运行和路由器流量控制

1. 路由器的运行

图 4-4 给出了路由器运行的流程图。

2. 路由器流量控制

出现下面的情况时，BACnet 路由器缓存器会出现溢出：路由器接收报文时，如果流量大于它的处理速度，产生溢出后，将导致数据丢失。因此 BACnet 路由器设置了一种功能，当它的缓存器将要溢出时，它能够通知源设备暂停发送数据或者放慢发送的速度。在 BACnet 网络中，路

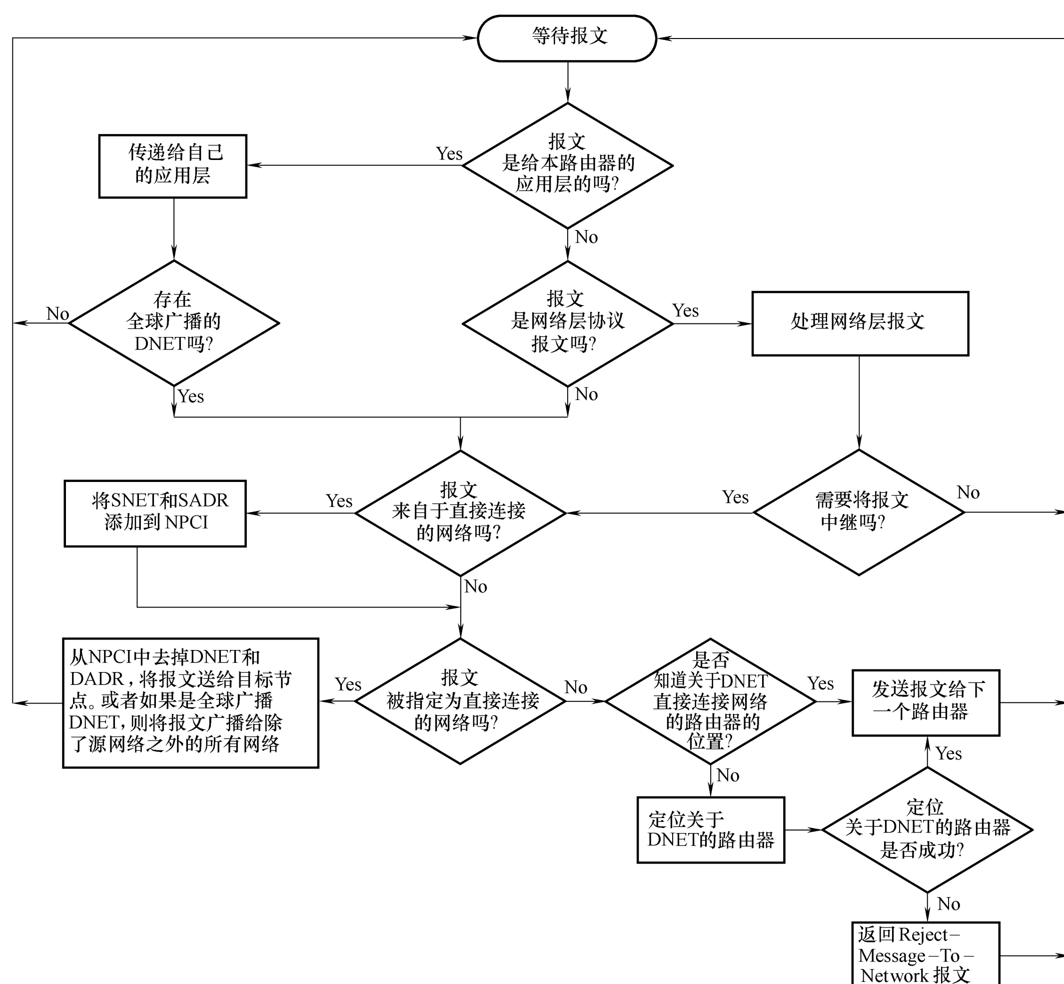


图 4-4　BACnet 网络路由器运行流程图

由器使用 Router-Busy-To-Network 报文和 Router-Available-To-Network 报文来实现流量控制的功能。

4.4.3　一种 BACnet 路由器产品

美国科动控制系统（苏州）有限公司生产的一种 BACnet 路由器如图 4-5 所示。该路由器用于在 BACnet/IP、BACnet 以太网和 BACnet MS/TP 网络之间路由消息。

部分性能参数：

1）BACnet/IP 网络和 BACnet® MS/TP 网络之间发送信息；

2）10Mbit/s/100Mbit/s 以太网直线、交叉自适应；

3）LED 诊断，包括 MS/TP 数据流监视器；

4）美国联邦通信认证标准 CFR 47，Part 15 Class A；

5）通过网页服务器试运行，重新设置及纠错；

6）可移除 MS/TP 端口连接头；

7）钉轨安装需要 24V 交流或直流电源；

8）MS/TP 波特率：9600 ~ 76800bit/s。

按照美国国家标准协会和美国采暖、制冷与空调工程师学会标准 ANSI/ASHRAE 135（ISO 16484-5）标准，BAS Router 可以在 BACnet/IP 网络与 BACnet MS/TP 网络之间进行数据转发。它能够使得 BACnet/IP 设备通过以太网和 MS/TP 设备通信。路由器是由 35mm 的钉轨安装，通过 24V 交流或直接电源通电。每个产品上有一个 MS/TP 端口，一个 10Mbit/s/100Mbit/s 以太网端口。路由器可以通过 WEB 页面进行参数设置。

MS/TP 端口提供一个光隔离收发器，还有 EIA-485 连接的 3-pin 的接线端子。通过这个端口，可以找到 127 个设备的地址，本地总线上有多达 31 个负载设备。所有 MS/TP 的波特率为 9.6 ~ 76.8kbit/s。

以太网端口提供一个屏蔽 RJ-45 连接头。通过自动协商和直线、交叉自适应功能，可以自动适应连接设备的双工设置、速率和信号极性。

内置网页服务器可以通过网页浏览器用来试运行，重新设置和纠错。可以通过自配的交换机把路由器设置为工厂初始 IP 地址。

产品上有 3 个 LED 显示灯，绿灯显示电源。以太网 LED 灯显示绿色为 100Mbit/s，显示黄色为 10Mbit/s，若闪烁表明活动。LED 绿灯闪烁显示收到 MS/TP 信号。



图 4-5　一款 BACnet 路由器

4.5　BACnet 数据链路和物理层规范

前面分析了数据链路和物理层是 BACnet 四层级简易模型中的应用层和网络层，接下来分析数据链路和物理层并介绍：BACnet 的 5 种数据链路/物理层的规范；BACnet 数据链路/物理层的功能、主要服务原语以及帧结构。

4.5.1　BACnet 数据链路/物理层支持和自定义的局域网技术

考虑应用环境的多样性，BACnet 标准定义的物理层和数据链路层支持多种局域网技术，这些局域网技术中包括自定义的局域网技术，如主—从/令牌数据链路协议 MS/TP 网络和 PTP 通信网络。物理层和数据链路层支持的其他局域网技术，如 LonWorks 网络、ARCnet 网络和以太网都是已有的局域网技术，即直接借鉴了现有的标准化技术及相应的标准。其中 LonWorks 网络及控制技术在工控及楼宇自控领域广为使用，以太网技术更是引导着网络技术的发展潮流。

不同局域网技术所建立的网络在数据传输速率、传输的数据帧格式（报文分组格式）、网络使用的传输介质及组成设备都彼此不同。这些异构网络之间一般不能直接连接通信，但这些不同的局域网技术各有特长，分别适用于不同的应用环境。

BACnet 标准目前将上述五种类型的数据链路/物理层技术作为自己所支持的数据链路/物理层技术进行规范，形成其协议和标准。BACnet 选择这些局域网技术的原因是从实现协议的硬件的可用性、数据传输速率、与传统 BAS 的兼容性和设计的复杂性等方面考虑的。

4.5.2　BACnet 的以太网规范

以太网是当前应用极为广泛的局域网技术，其协议包括逻辑链路控制协议（LLC）、载波侦听多路访问/冲突检测（CSMA/CD）媒质访问控制协议和相应的物理介质协议等。ISO 8802-3 标

准是以太网标准，标准将以太网分为 MAC 层和物理层。其中 MAC 层通过该标准中的“LLC 子层/MAC 子层界面服务规范”向 LLC 子层提供服务。

1. BACnet 网络对 ISO 8802-2 逻辑链路控制协议（LLC）的使用

BACnet 网络使用 LLC 的数据链路服务来传送 BACnet 链路服务数据单元（LSDU）。一个 LSDU 包含一个网络层协议数据单元（NPDU）。使用 ISO 8802-3 局域网技术的 BACnet 设备使用 DL-UNITDATA 原语传送 LLC 参数。

DL-UNITDATA 原语中包括的参数有：信源地址、信宿地址、要传输的数据以及优先级控制。源地址和目标地址各自分别是一个 6B 由网络接口硬件确定的［MAC 地址和 1B 的链路服务访问点（LSAP）］参数。LSAP 的值为 X‘82’，就表示该 LSDU 内包含有 BACnet 数据。数据参数就是来自网络层的 NPDU。

2. MAC 原语所要求的参数

ISO 8802-3 MAC 层原语是 MA-DATA. request 和 MA-DATA. indication。这些是用源节点和目标节点的 MAC 地址封装的 LLC 数据的帧结构，图 4-6 是这种帧的数据结构图。其中，APDU 是应用层协议数据单元，NPCI 是网络层协议控制信息。DSAP 和 SSAP 分别是目标节点和源节点的链路服务访问点参数，在此情况下，其值都为 X‘82’，表示帧内包含有 BACnet 数据。整个帧由物理介质传送到目标节点设备。

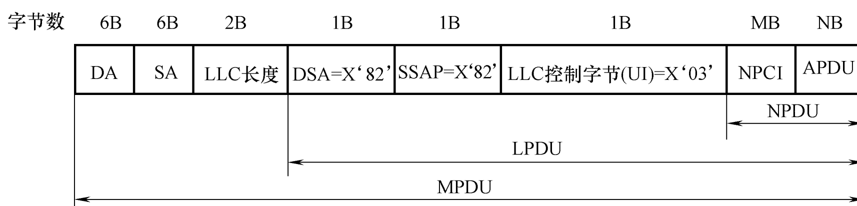


图 4-6　BACnet 标准的以太网数据帧结构

4.5.3　BACnet 的 ARCnet 局域网规范

1. ANSI/ATA 878.1—1999 标准

ARCnet 是 1977 年由 Datapoint 公司开发的一种局域网（LAN）技术，这是一种很成熟的嵌入式实时局域网技术，数据传输速率为 2.5Mbit/s。ARCnet 技术采用令牌总线（token-bus）的媒质访问方式来管理 LAN 上工作站和其他设备之间的共享线路，网络中的每个节点设备可以设置等待发送报文时间的最大值，用这种方式解决应用的可靠性问题。在 ARCnet 中，LAN 服务器总是在一条总线上连续循环地发送一个空信息帧。当有设备要发送报文时，它就在空帧中插入一个“令牌”以及相应的报文。当目标设备或 LAN 服务器接收到该报文后，就将“令牌”重新设置为 0，以便该帧可被其他设备重复使用。这种方案是十分有效的，特别是在网络负荷大的时候，它为网络中的各个设备提供平等使用网络资源的机会。

ARCnet 网络技术采用了美国国家标准（ANSI/ATA 878.1—1999）。（ARCnet Trade Association，ATA）致力于在不同的应用中推广这种嵌入式网络技术。ATA 是 ANSI（美国国家标准局）认可的标准研发协会，并指定该协会对 ANSI/ATA 878.1—1999 标准进行维护更新。BACnet 标准将 ANSI/ATA 878.1—1999 ARCnet 局域网标准，包括未来的扩展，作为自己的标准。同时，仍然使用 ISO 8802-2 中的 Class I LLC 和类型 1 不确认的无连接模式服务作为逻辑链路控制协议。

2. LLC 原语的参数和 LLC 原语向 ARCnet MAC 层的映射

（1）LLC 原语的参数

BACnet 网络使用 DL-UNITDATA 原语传送 LLC 参数。DL-UNITDATA 原语中的参数是信源地址、信宿地址、数据和优先级。信源地址和信宿地址就是由网络接口硬件确定的介质访问控制地址，分别占用 1B。

1B 的链路服务访问点参数和系统代码（SC）参数各自也占用 1B。LSAP 的值都为 X‘82’，表示本 LSDU 内包含有 BACnet 数据。SC 的值为 X‘CD’，表示此数据结构是一个 BACnet 帧。数据参数就是来自网络层的 NPDU。ARCnet MAC 层运行在只有一个服务类别的单优先级模式下，所以没有优先级参数的规范。

（2）LLC 原语向 ARCnet MAC 层的映射

类型 1 不确认的无连接 LLC 服务直接映射成 ARCnet 的 MAC 原语 MA-DATA. request。没有指示原语传递给 LLC 子层，但是从目标 MAC 子层有一个确认返回。ARCnet 不允许其 MSDU 的长度为 253B、254B 或者 255B。长度为 0～252B 的 BACnet LPDU 作为 ARCnet MPDU 帧的整个 MSDU，其中 MPDU 中具有 1B 的信息长度（IL）域。长度为 253～504B 的 BACnet LPDU 作为 ARCnet MPDU 的 MSDU 的前部分，后面加上 3B 不确定数值，长度达到 256～507B，其中 MPDU 中具有 2B 的信息长度域。在接收方，如果检测到 ARCnet 的 MPDU 信息长度域有 2B，则要去掉 MSDU 中的最后 3B。ARCnet 中不能传输长度超过 504B 的 LPDU。

3. MAC 原语所要求的参数

ARCnet 网络 MAC 层原语是 MA-DATA. request、MA-DATA. indication 和 MA-DATA. confirmation。LLC 数据帧中包含有信源节点和信宿节点的 MAC 地址，图 4-7 是 LLC 数据帧的结构图。其中，APDU 是应用层协议数据单元，NPCI 是网络层协议控制信息。DSAP 和 SSAP 分别是信宿节点和信源节点的链路服务访问点参数，在此情况下，其值都为 X‘82’，表示帧内包含有 BACnet 数据。整个帧由物理介质传送到目标节点设备。

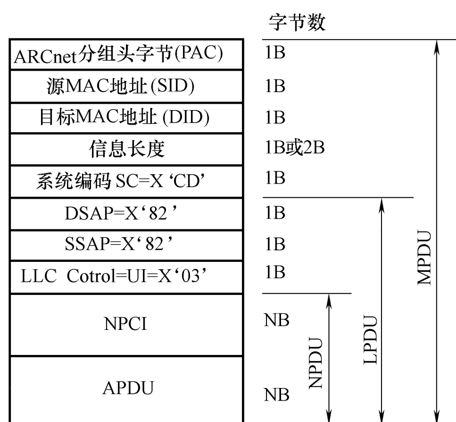


图 4-7　LLC 数据帧的结构图

4.5.4　MS/TP 局域网规范

1. BACnet MS/TP 概述

BACnet MS/TP 即主—从/令牌数据链路协议，“MS” 含义：MASTER/SLAVE（主/从），“TP” 的含义：TOKEN　PASSING（令牌传递）。BACnet MS/TP 的数据通信模式实质上一种主从数据通信模式，但是这种模式是基于令牌传递过程进行的。在令牌传递（TOKEN PASSING）的过程中，哪个节点设备获得令牌，就承担了主从数据通信中的主站点角色，那些没有获得令牌的节点设备都处于“从站点”状态。MS/TP 协议是一个数据链路层的标准，该标准定义了 MS/TP 网络的物理层采用技术成熟的 EIA-485 标准，而 EIA-485 又具有较好抗干扰和低成本的特点，所以 MS/TP 局域网是一种具有较好性能/价格比的楼宇自控网络。

MS/TP 局域网中，存在主站点（Master）和从站点（Slave）两种工作方式不同的站点，使用“令牌（Token）”机制作为媒质访问控制方式。令牌只在主站点间传递，但主站点只有在得到令牌时，才能访问传输介质并向传输信道发送信息帧，否则与从站点一样只能处于接收和监听状态。在数据帧的传送过程中，从站点始终得不到令牌，因此只能进行监听和接收数据帧，并在响应主站点时才具有发送响应帧的能力。当 MS/TP 网络完全由主站点组成，此时 MS/TP 网络就是一个对等令牌访问网络。当 MS/TP 网络只有一个主站点时，MS/TP 网络就是一个工作于主从

模式的网络。这就是说：MS/TP网络可以在对等模式下工作，也可以在主从模式下运行，网络的组织方式较为灵活。

在MS/TP局域网中，节点设备或站点地址用1B来表示。MS/TP标准将地址255作为广播通信的地址，因此一个MS/TP网络最多可以挂接255个站点。其中，主站点的地址编码范围是0～127，从站点地址编码范围是0～254。MS/TP网络在进行站点地址分配时，一般情况下将0地址分配给与MS/TP网络直接连接的路由器。

MS/TP网络使用一个令牌来控制设备对网络总线的访问。当主节点掌握令牌时，就可以通过总线发送数据帧。收到主站点请求报文的其他主站点根据请求发送响应报文，网络中的从站点在收到主站点请求报文时，向主站点发送响应报文。当一个主站点在发送完报文之后，就将令牌传递给下一个主站点。如果主站点要发送多个报文，在它掌握令牌的期间内，发送的报文数量受到限制，最多发送$N_{max_info_frames}$个数据帧，下来的事情就是将令牌传递给下一个主站点，这一轮的报文发送就结束了，如果还有报文要发送，就只能等待下一次再掌握令牌重复上述过程了。

令牌传递过程中某站点发送报文后，不进行发送确认，但是要侦听接收令牌的节点是否开始使用令牌。

MS/TP网络定义了从节点不能掌握令牌，因此规定所有节点，不论是否握有令牌，都必须对请求报文作出响应。发出请求报文的主节点在收到应答之前不释放令牌。收到请求报文的从节点要立即发回应答报文，而收到请求报文的主节点可以选择发回应答报文或者发送一个“延迟应答”报文，告知它将延迟应答到它自己掌握令牌时再发送。

当得到令牌的站点由于故障无法继续正常通信时，MS/TP网络的通信出现非正常中断，每个站点会自动计算通信中断的静默时间，如果超过规定的静默时间，则会随机出现一个站点并产生新的令牌，继续令牌传递过程，保证通信的正常进行。一个主站点在传出令牌后会监视其他站点对令牌的使用情况，如果得到令牌的站点进入不对令牌进行操作的实效状态，则该站点会被自动从令牌环中剔除。

对于有新站点加入的情况：在令牌传递过程中，站点或控制器在得到令牌时对本网段的空余位置发出查询命令，如果得到正确应答，说明有新的站点或控制器申请加入令牌环，就把令牌传递给新的站点或控制器，使其自动加入到令牌环中。于是，新的站点或控制器加入网络，MS/TP网络会自动识别，无需重新配置。由哪个站点或控制器何时发出查询命令，是由BACnet的算法决定的，这个算法的目的是使查询命令不占用过多的网络时间，并且新控制器可以在一个可接受的时间内被发现。

MS/TP网络技术的基础是在物理层使用EIA-485标准。由于EIA-485标准只是一个物理层标准，不能解决设备访问传输介质的问题，因此主从/令牌传递（MS/TP）协议才能提供数据链路层功能。通过MS/TP链路层标准和物理层EIA-485标准组合，解决了链路层的介质访问和物理层的硬件接口通信问题。

MS/TP EIA-485网络使用屏蔽双绞线作为信号传输介质，特征阻抗为100～130Ω。EIA-485节点有3种类型，分别是具有网络偏置电阻的节点、具有本地偏置电阻的节点和无偏置电阻的节点。

2. 服务规范

MS/TP网络提供两个数据链路层服务原语，向网络层提供服务，这两个服务原语分别是DL-UNITDATA. request和DL-UNITDATA. indication。前者由网络层传递给MS/TP实体，请求使用不确认的无连接方式向一个或者多个远程节点的网络层实体发送一个网络层协议数据单元（NPDU）。后者由MS/TP实体传递给网络层，通知有一个来自远程实体的NPDU到达。

3. MS/TP 网络的通信过程

BACnet MS/TP 网络的通信过程如图 4-8 所示，在实际工程应用中，通信过程中的某些步骤可能会被省略或跳过了，在图 4-8 中，令牌传送到 3 号控制器，3 号控制器恰巧没有数据要发送，于是令牌就直接传递给下一个控制器。或者是 3 号控制器命令 4 号控制器，但该命令是一个无需回答的命令，如果 4 号控制器没有应答，则 3 号控制器接下来就命令 1 号控制器。当前得到令牌的控制器发出什么样的命令取决于网络层和应用层的需求。

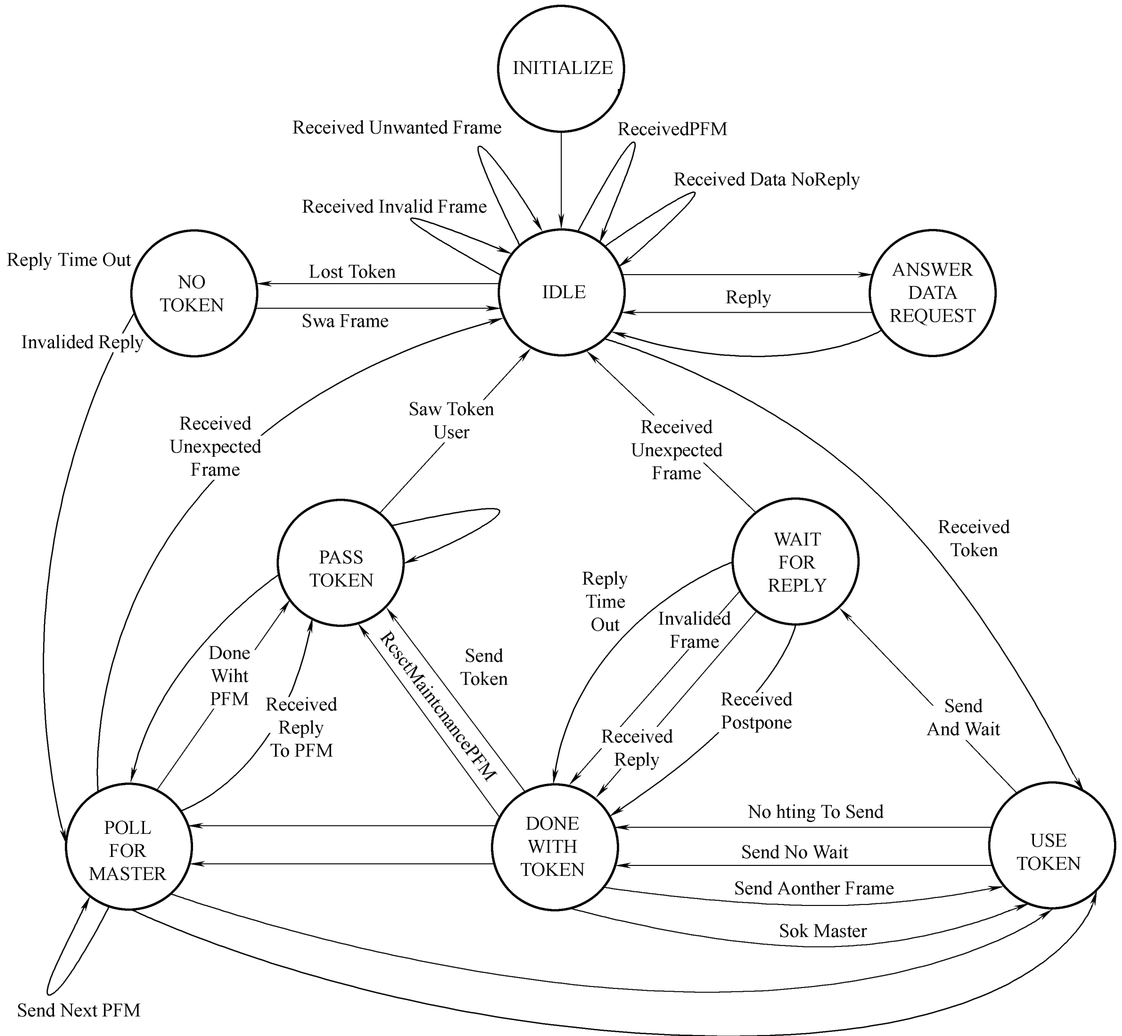


图 4-8　BACnet MS/TP 网络的通信过程

MS/TP 网络工作时会遇到一些意外情况，如得到令牌的控制器突然出现故障，通信过程就暂时中断，网络中的其他控制器自动计算这种暂时中断造成的寂静时间，一旦这种计时超过规定值，由令牌产生算法就会产生新的令牌并为某台控制器得到，使 MS/TP 网络的正常通信过程继续下去。

当某个得到令牌的控制器一直没有执行后续的操作时，站点删除算法会自动将该控制器从令牌环中删除；当有新的控制器加入，由新站点的插入算法，将该控制器加入令牌环。新的控制器加入网络后，BACnet MS/TP 会自动识别。

4. MS/TP 帧结构

MS/TP 网络的帧格式如图 4-9 所示，帧结构由：前导码、帧类型、目标地址、信源地址、帧长度、帧头 CRC、数据段、数据 CRC、填充段组成。

（1）前导码

该域占 2B，标志 MS/TP 帧的开始，其值为 X’55FF’。

（2）帧类型

该域占有 1B，用来区别不同类型的 MS/TP 帧类型。MS/TP 局域网规范定义了 8 种类型帧：

1）00：令牌；

2）01：主节点轮询帧；

3）02：响应主节点轮询帧；

4）03：测试请求帧；

5）04：测试响应帧；

6）05：BACnet 数据期待响应帧；

7）06：BACnet 数据不期待响应帧；

8）07：响应延迟帧；

9）08～127：保留为 ASHRAE 所用帧；

10）128～255：生产商定义的专用帧。

前导码	2B
帧类型	1B
目标地址	1B
信源地址	1B
帧长度	2B
帧头CRC	1B
数据段	0～501B，只在“长度”字节不为0时才存在
数据CRC	2B
填充段	1B (可选域)

图 4-9　BACnet 的 MS/TP 局域网的帧格式

要注意的是，目标地址域值为 255（X‘FF’）表示此帧为广播帧，而源地址域的值不允许为 255。地址值 0～127 可用来表示主节点和从节点，而地址值 128～254 只能用来表示从节点。数据域的长度为 0～501B。

5. MS/TP 网络媒质访问控制算法

MS/TP 网络的令牌传递方式和令牌逻辑环的维护方法影响着媒质访问控制算法，而且在 MS/TP 网络由于令牌传递是对等的，因此就不再支持有关优先级的算法。

MS/TP 网络媒质访问控制算法主要有：令牌传递算法、新站点的插入算法、站点删除算法、多令牌检测算法、令牌产生算法和帧发送算法等。

6. BACnet MS-TP 帧实例

以 Whois、Iam 为例说明 BACnet MS-TP 帧格式。

（1）没有查找范围的 Whois

数据包长度：19B。

数据包详情：（十六进制格式）（红色为数据包头，结尾处为 Padding 字符 0xFF）。

55 FF 06 FF 01 00 08 85 01 20 FF FF 00 FF 10 08 15 B6 FF

（2）带有查找范围的 Whois

数据包长度：23B。

数据包详情：（十六进制格式）（红色为数据包头，结尾处为 Padding 字符 0xFF）。

55 FF 06 FF 01 00 0C 78 01 20 FF FF 00 FF 10 08 09 00 19 FF 21 B9 FF

（3）Iam 应答信息

数据包长度：30B。

其中，Iam 的信息中包括 Max APDU = 244 VendorID = 04 DeviceInstance = 00 00 02。

数据包详情：（十六进制格式）（红色为数据包头，结尾处为 Padding 字符 0xFF）。

55 FF 06 FF 02 00 13 27 01 20 FF FF 00 FF 10 00 C4 02 00 00 02 21 F4 91 03 21 04 E6 77 FF

· WhoIs Without range limit
· Length：19
· Data：55 FF 06 FF 01 00 08 85 01 20 FF FF 00 FF 10 08 15 B6 FF
· WhoIs With range limit（0 ~ 255）
· Length：23
· Data：55 FF 06 FF 01 00 0C 78 01 20 FF FF 00 FF 10 08 09 00 19 FF 21 B9 FF
· IAM
· IAm with max apdu = 244 VendorID = 04 00 00 02 = Device instance
· Length：30
· Data：55 FF 06 FF 02 00 13 27 01 20 FF FF 00 FF 10 00 C4 02 00 00 02 21 F4 91 03 21 04 E6 77 FF

4.5.5 BACnet 网络架构

BACnet 网络架构如图 4-10 所示。在管理层采用以太网作为管理网络，BACnet 工作站挂在管理网上。控制网络可以选 ARCnet 网络、MS/TP 网络网络、以太网、LonWorks 网络、PTP 网络中的一种，也可以同时使用这些网络的其中两种或两种以上。每一个不同的控制网络都构成了一个不同的通信域和控制域，两种不同的控制网络之间可以使用网关来实现互联，构成一个连通域，控制网络和管理网络之间是通过网间路由器或网络控制器（也叫全局控制器）来实现互联的。从 BACnet 网络架构图中可以看到：不同厂商制造的产品可以应用在同一个 BACnet 系统中。

这里需要强调的是：一般情况下，使用以太网作为底层的控制网络是指要使用工业以太网，而不是指普通的商业以太网或办公以太网，如果使用普通的商业以太网作为控制网络，网络应设置为全双工运行模式，而且仅适于组织小规模点数较少且现场环境不是较恶劣的情况下的 BAS。

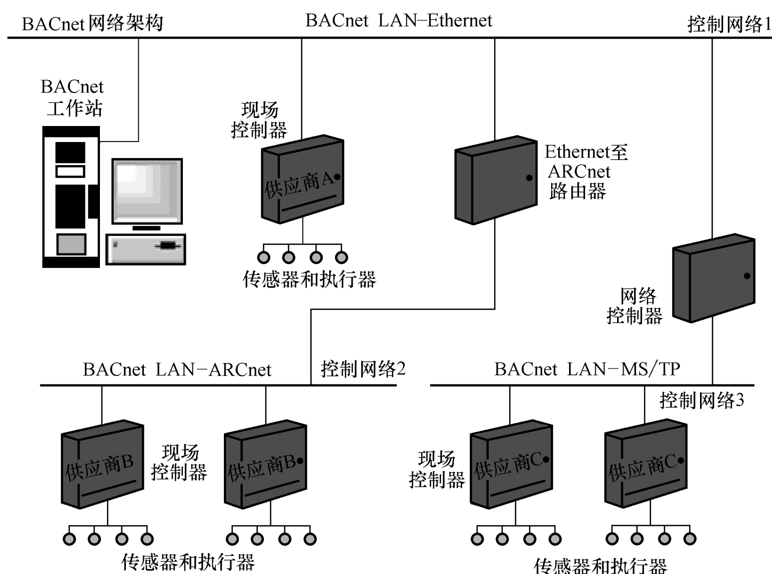


图 4-10 BACnet 网络架构

第 5 章　BACnet/IP 网络

楼宇自控技术的发展与计算机网络技术在同步发展，要使 BAS 具有良好的远程监控性能，一般要通过 Internet 来实现大区域的数据通信。而 BACnet 楼宇自控网络是局域网，要实现与远程通信和大范围的网络互联，就要借助于 BACnet 网络与 Internet 的互联。

5.1　IP 网络与 BACnet/IP 互联协议的提出

5.1.1　TCP/IP 体系中的 IP

1. OSI 模型中网络层通信协议

以太网以及 Internet 技术广泛地使用了 TCP/IP 通信协议，TCP/IP 通信协议是一个通信协议簇，它包括了诸如 IP 网际协议、路由选择协议、ARP（地址解析协议）、RARP（逆地址解析协议）、ICMP（Internet 控制报文协议）、IGMP（Internet 组管理协议）、TCP（传输控制协议）、UDP（用户数据报协议）、FTP（文件传输协议）、HTTP（超文本传输协议）、SMTP（简单邮件传输协议）、SNMP（简单网络管理协议）等。

其中 IP 工作在计算机网络 OSI 模型的网络层，TCP/IP 的 IP 层相当于 OSI 模型的网络层，IP 层向网络层的上一层传输层提供无连接的 IP 数据报服务。在 TCP/IP 体系中，网络层包含 5 个协议：IP（Internet Protocol）、ARP 、RARP、ICMP 和 IGMP。其中，IP 是用于传输 IP 分组的协议；ARP 实现 IP 地址到物理地址的映射；RARP 则是实现从物理地址到 IP 地址的映射；ICMP 是用于网络层中控制信息的产生和接收分析；IGMP 是实现组播功能的协议。网际协议（IP）是在网络中信源工作站和信宿工作站之间传送 IP 数据报的协议，它提供对数据大小的重新组装功能，以适应不同网络对报文的要求。

采用 OSI 模型的通信网络如果在网络层使用 IP 网际协议的网络就是 IP 网络。Internet 是 IP 网络，以太网是 IP 网络。

2. IP 数据报

如前所述，数据在网络层的组织形式是 IP 数据报，IP 数据报由两部分组成：数据报头和数据部分。在发起通信的过程中，传输层的报文下移到网络层后，使用 IP 对数据进行加工处理，处理步骤有：对报文加 IP 数据报头，在传输过程中，控制 IP 数据报的转发和处理。在 IP 数据报的报文结构中，IP 地址写在 IP 数据报的首部里。

IP 数据报的格式如图 5-1 所示。

（1）版本号

IP 数据报头部第一项就是 IP 的版本号，数据量是 4 位。网络通信中的主机或中间路由器在接收和处理每个 IP 数据报时，要首先检验版本号，确保使用正确的协议版本。

（2）长度字段

IP 数据报中有两个长度字段：头长度和总长度。头长度表示 IP 数据报头的长度，占用 4 位，总长度表示 IP 数据报总长度，占用 16 位，它的值是以字节为单位的。IP 数据报头又分为固定部分和选项部分，固定部分正好是 20B，而选项部分为变长。因此需要用一个字段来给出 IP 数据报头的长度。

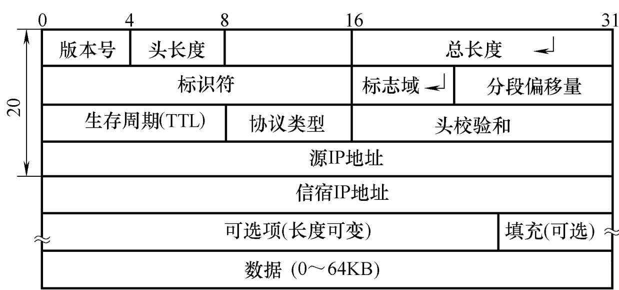


图 5-1　IP 数据报的格式

（3）服务类型

IP 数据报头中的服务类型字段规定了对于本数据报的处理方式。该字段为 1B，结构如图 5-2 所示。其中优先权子域占 3 位，表示传输类型的标识字符 D、T、R、C 各 1 位，保留内容占 1 位。

优先权表示所在 IP 数据报的重要程度，取值范围从 0 ~ 7 表示一般优先级，7 表示具有最高的网络控制优先级，值越大，优先级越高。

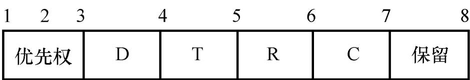


图 5-2　服务类型

D、T、R、C 表示所在 IP 数据报的希望传输类型：

1）D：DELAY——要求有更低的时延；

2）T：TROUGHPUT——要求有更高的吞吐量；

3）R：RELIABILITY——要求有更高的可靠性；

4）C：要求选择完成 IP 数据报传输具有开销更为低廉的路由。

3. IP 地址、子网掩码及子网划分

TCP/IP 规定了计算机如何进行通信，同时该协议还具有路由功能。TCP/IP 使用 IP 地址识别网络中的计算机，每台计算机必须拥有惟一的 IP 地址。

TCP/IP 采用分组交换方式的通信方式。TCP 把数据分成若干数据包，并写上序号，以便接收端能够把数据还原成原来的组织方式；IP 为每个数据包写上发送主机和接收主机的地址，这样数据包即可在网络上传输。在传输过程中可能出现顺序颠倒、数据丢失或失真，甚至重复等现象。这些问题都由 TCP 处理，它具有检查和处理错误的功能，必要时可以请求发送端重发。

IP 地址和子网掩码是 TCP/IP 网络中的重要概念，它们的共同作用是标识网络中不同的计算机及识别计算机正在使用的网络。

（1）IP 地址

基于 TCP/IP 网络及 Internet 中的每一台计算机都必须以某种方式惟一地标识，否则网络不知道如何传递消息。IP 地址是 TCP/IP 网络及 Internet 中用于区分不同计算机的数字标识，作为统一的地址格式，它由 32 位二进制数组成并分成 4 个 8 位部分。由于二进制使用不方便，所以通常使用“点分十进制”方式表示 IP 地址。即把每部分用相应的十进制数表示，大小介于 0 ~ 255，例如 192. 168. 0. 1 和 200. 200. 200. 66 等都是 IP 地址。

一个 IP 地址实际上由网络（Network）号和主机（Host）号两部分组成，通过对 IP 地址中的网络号、主机号的识别和使用，可以容易地辨识不同的网络和不同的主机。不同网络中的计算机可以拥有相同的主机号。

IP 地址有 5 类，A 类 ~ E 类，各用在不同类型的网络中。地址分类反映了网络的大小以及数

据包是单播还是组播的。

任何一个接入Internet网络的一台主机必须有一个惟一的IP地址，当使用网络服务供应商提供的某种宽带接入方式接入Internet时，常常由网络服务供应商用一种自动分配IP地址的方式为用户分配一个IP地址。如果建立的只是公司内部或家庭局域网，那么即可自己设置IP地址而不必向ISP申请。也就是说，很多局域网内部的IP地址是虚拟的IP地址，不是在Internet上进行通信的真实IP地址。

（2）子网分割和子网掩码

子网分割可以使IP地址更具灵活性。每个子网有惟一的子网地址。将网络分割为若干个子网，使用子网分割技术，IP地址就具有了更大的灵活性。

要分割子网，需从主机地址借用几位，构成子网地址。

如某个B类IP地址：

10101000	01011111	00000000	00000000
网络地址		主机地址	

点分十进制表示：（168.95.0.0）

借用主机地址的前3位作为子网地址：

10101000	01011111	00000000	00000000
网络地址		主机地址	
		子网地址	

子网地址与原先的网络地址合起来共16位+3位=19位，可作为新的网络地址，用来识别子网。原来16位的网络地址是不能变动的，但子网可以自行分配。若子网地址使用3位，则产生$2^3=8$个子网：

10101000	01011111	00000000	00000000
10101000	01011111	01000000	00000000
10101000	01011111	01100000	00000000
		—————	
10101000	01011111	10100000	00000000
10101000	01011111	11000000	00000000
10101000	01011111	11100000	00000000
网络地址		子网地址	主机地址

从主机地址借用3位，可分割出8个子网。主机地址变短后，拥有的IP地址数量减少了。如原B类地址可有$2^{16}=65536$个可用的主机地址，而新建立的子网，仅有$2^{13}=8192$个可用的主机地址了。

分割子网，子网地址取自主机，每借用主机地址K位，便会分割2^K个子网。

在实际应用中，子网地址与主机地址不能全为0或1，这是一个原则。

分割后的子网要能与其他网络互联，即在路由过程中仍能识别这些子网。子网掩码也是一个32位的序列值，其功能主要有两个：

1）区分IP地址中的网络号与主机号；

2）将网络分割为多个子网。

子网掩码的特性如下：

1）有一串连续的1，再跟上一串连续的0组成。

如：11111111　11111111　11110000　00000000

2）子网掩码使用与IP地址相同的点分十进制表示。

如：11111111　11111111　　11111111　00000000

写为 255. 255. 255. 0。

3）子网掩码与 IP 地址配对使用才有意义，单独的子网掩码是无意义的。

子网掩码与 IP 地址对应位并列，子网掩码中的 1 序列映射的部分是网络地址，0 序列映射的部分是主机地址，如：

IP地址:	10101000	01011111	11000	000	00000001
子网掩码:	11111111	11111111	11111	000	00000000
	网络地址			主机地址	

IP 地址：168. 95. 192. 1；子网掩码：255. 255. 248. 0。

从中看出：IP 地址的前 21 位是网络地址；后 11 为主机地址。

进行网络连接的路由过程中，据此判断 IP 地址中网络地址的长度，以便将 IP 信息包送至目的网络。

如果一台主机的 IP 地址为 168. 95. 120. 28，子网掩码为 255. 255. 0. 0，则网络号为 168. 95，主机号为 120. 28。

另一台主机的 IP 地址为 168. 95. 116. 39，子网掩码为 255. 255. 0. 0，则网络号为 168. 95，主机号为 116. 39。所以这两台主机是同一个网络内的。一个被子网化的 IP 地址包括 3 个部分：网络号、子网号和主机号。

4. 数据报的分段和重组

IP 数据报要放在 MAC 帧中再进行传输，这一过程叫做封装。IP 数据报的最大长度可达 64 KB，IP 需要一种分段机制，把一个大的 IP 数据报分成若干个小的分段进行传输，最后到达目的地后再重新组合还原成原来的 IP 数据报并进而还原成原来的数据块。

分段可以在任何必要的中间路由器上进行，而重组仅在目的主机处进行。在 IP 报头中，共有 3 个字段用于实现对数据报的分段和重组：标识符、标志域和分段偏移量。

IP 在发送 IP 数据报时，经常要将这个数据报的数据部分分割成若干个较小的数据片，组成较小的报文，然后放到物理帧中去发送。每个小的报文称为一个分段，分段的动作一般在路由器上进行。

重组是分段的逆过程，把若干个 IP 分段重新组合后还原为原来的 IP 报文。在信宿节点收到一个 IP 报文时，可以根据其分段偏移量和 MF 标志位来判断它是否是一个分段。如果 MF 位是 0，并且分段偏移量为 0，则表明这是一个完整的 IP 数据报。否则，如果分段偏移量不为 0，或者 MF 标志位为 1，则表明它是一个分段。这时信宿节点需要实行分段重组。

5. IP 报文转发

一个 IP 数据报从信源节点发送到信宿节点，一般情况下要经历若干个路由器，而路由器的作用就是存储转发 IP 数据报，为每个 IP 报文寻找最佳路由。IP 报文转发过程如图 5-3 所示。

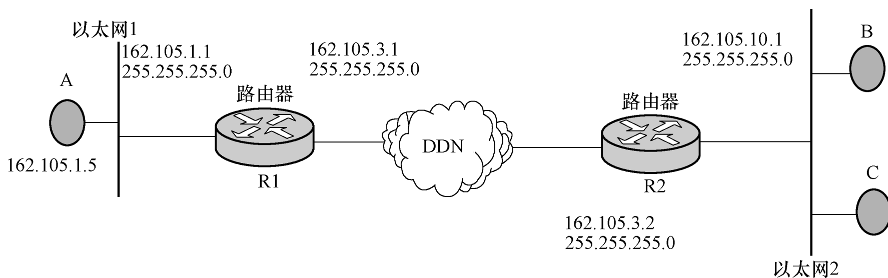


图 5-3　IP 报文转发过程

路由器 R1 收到主机 A 发送给主机 C 的 IP 数据报。R1 的数据链路层根据帧中的以太网类型确定帧中的数据是 IP 数据报文，于是交给 IP 处理。IP 首先要检验 IP 报文头中的各个域的正确性，包括版本号、校验和长度等。如果发现错误，则丢弃该数据报；如果全部正确，则把生存周期 TTL 域的值减 1。

若 TTL 的值为 0，数据报到期，应该丢弃；TTL 大于 0，根据 IP 数据报中信宿节点地址查询 R1 中的路由表；如果找到合适的路由，把该数据报向下一路由节点转发，转发前根据下一节点的 MAC 地址装配成 MAC 数据帧，如果没有找到合适路由，则丢弃该数据报。

5.1.2　BACnet/IP 网络的互联与 BACnet/IP 互联协议的提出

1. BACnet 网络的互联

BACnet 网络是局域网，当两个 BACnet 网络互联或多个在地域上相距较远的 BACnet 网络互联组成更大的 BACnet 网络时，最佳的实现方法就是使用现有的 IP 和广域网将 BACnet 网络互联，而 Internet 就是遵从 TCP/IP，当然也遵从 IP 的最大广域网。由于 BACnet 设备和 IP 设备使用的是不同的协议、不同的语言，不能将这些设备所在的网络简单地互联在一起。

网络通信协议的主要功能有：定义网络节点之间进行数据交换时的报文分组格式、数据输运的数据帧格式、信源地址和信宿地址的数据表述格式和占用字节数、冗余控制信息的组织方式、检错纠错的机制等。BACnet 设备可以是 BACnet 网络中的节点设备，也可以是节点设备的下一级连接设备，网络使用 BACnet 通信协议；IP 网络设备，可以是 TCP/IP 网络中的节点设备，也可以是节点设备的下一级连接设备，网络使用 TCP/IP 通信协议簇。使用路由器将两个或多个不同的网络互联，形成互联网（internetwork），于是有 BACnet 互联网、IP 互联网等。使用路由器将两个不同的网络互联时，路由器在接收到 A 网络发来的报文时，需要确定是否要将这个报文转发到 B 网络中，因此它必须能够理解 A 网络帧遵从的协议。BACnet 路由器能够理解和转发 BACnet 数据帧，IP 路由器能够理解和转发 IP 数据帧。如果将若干个不同的 BACnet 局域网使用 BACnet 路由器互联形成 BACnet 互联网，如果使用 IP 路由器将不同的 BACnet 互联网互联起来形成的网络是一个“超级”互联网，能够实现大范围的互联和性能优良的远程通信。

若干个 BACnet 网络通过 IP 广域网互连面临的主要问题是 IP 路由器不能识别 BACnet 数据帧。解决这个问题的方法是使用一个也能够理解 IP 的特别 BACnet 设备，能够将 BACnet 数据报文封装到一个 IP 数据帧中，并能够将该 IP 数据帧再转发到毗邻的 IP 网络中，当包含有 BACnet 数据帧的 IP 数据帧传输到目标节点后，同样有一个这样的设备用来从 IP 数据帧中拆分出 BACnet 数据报文，在 BACnet 局域网中传输和处理。

BACnet 标准使用两种技术来实现 IP 网络将多个 BACnet 网络互联。第一种技术：B/IP PAD（BACnet/Internet Protocol Packet-Assembler-Disassembler，BACnet/Internet 协议包封装/拆装设备）技术，这种技术也叫“隧道”技术，其设备称之为 BACnet/IP 分组封装/拆装设备，简称 PAD，功能和作用相当于一个路由器，能够识别 BACnet 报文并将 BACnet 报文进行 IP 数据帧封装，然后通过 IP 互联网传输。第二种技术称为 BACnet/IP 网络技术，设备称之为 BACnet/IP 设备，其作用就是直接将 BACnet 报文封装进 IP 帧中进行传输。

2. BACnet/IP 互联协议的提出

随着网络通信技术、精细控制技术，计算机及信息处理技术的发展以及对 BAS 性能的不断提高，对 BAS 的远程监控性能要求越来越高。对于 BACnet 应用系统来讲，要不断地持续提高远程监控性能、通信能力以及同类系统及异构系统的互联互通能力，就必须要将 BACnet 标准的内容与 Internet 的 TCP/IP 标准进行融合和扩展。通信协议定义了设备之间交换的报文分组的格式、数据帧的格式以及包含目标地址、报文发送端地址和按协议进行的封装格式，为了适应 BACnet

设备能够和 IP 设备进行顺畅的通信，提出 BACnet/IP 也就是一种很自然的技术发展需求了。

为了使 BACnet 局域网能与 Internet 进行通信，BACnet 标准于 1999 年定义了新的互联协议 BACnet/IP（135A），并作为 BACnet 标准附件 J，成为支持 BACnet 标准的第 6 种自控网络技术。BACnet/IP（135A）作为 135—1995BACnet 标准的补充，可以实现在世界上任何一个地方都能通过 Internet 对 BAS 的监控对象实施监控，BACnet 应用系统具有了使用互联网进行大地域监控的能力。

5.2 B/IP PAD 技术

5.2.1 B/IP PAD 技术（隧道技术）的基本原理

将 BACnet 数据报文通过 IP 路由器进行传输的技术，这种技术称之为 B/IP PAD 技术（“隧道技术”），在 BACnet 标准附件规范中也叫做 BACnet/Internet 协议分组组装/分解器技术，其关键功能可以直接内建到 BACnet 节点设备之中。

BACnet 设备要与 Internet 进行通信，必须采用 TCP/IP，这就需要采用附加的传输层协议，面向连接的 TCP 和不面向连接的 UDP 都是传输层协议。进行网络通信时节约软硬件开销的 UDP 结合 BACnet 协议已经提供包传输的可靠保证，因此采用 UDP 是合理和有效的。

B/IP PAD 技术（隧道技术）的基本原理是：将 BACnet 数据包首先使用 UDP 用户数据报协议进行封装，形成 UDP 数据报（这里的 BACnet 数据包是 UDP 数据报的纯数据部分）送入 IP 网络传输；当封装有 BACnet 数据包的 UDP 数据报到达信宿节点时，再将 UDP 数据报（IP 数据包）进行拆解，即拆分出原有的 BACnet 数据包，于是在 IP 网络中开辟了一条“隧道”，将 BACnet 数据包从信源节点传输到信宿节点。隧道的一端，进行协议报文的包装，在隧道的另一端进行协议报文的拆封。

隧道技术适用范围很广，它可以在任何一个网络中建立一个隧道或通道，将另外一种异构网络的数据报文通过前一个网络进行传输，实际上这就是异构网络的互联及通信。

5.2.2 B/IP PAD 的实现结构

B/IP PAD 在 B/IP PAD 技术中，既可以作为 IP 网络的一个节点，同时又是一个 BACnet 局域网的路由器节点。B/IP PAD 既具有解析、执行和实现 IP 的 UDP 用户数据报功能，同时也具有 BACnet 局域网路由器的功能，即具有解析、执行和实现 BACnet 局域网网络层协议的功能。在 IP 网络中传输 BACnet 数据包时，使用默认的 UDP 端口 X’BAC0‘，但有些情况下也可以利用其他的 UDP 端口进行通信，这里给出 TCP 或 UDP 端口的分配规则，以供参考：

1）端口 0：不使用，或者作为特殊的使用；

2）端口 1 ~255：保留给特定的服务，TCP 和 UDP 均规定，小于 256 的端口号才能分配给网上特定的服务；

3）端口 256 ~1023：保留给其他的服务，如路由；

4）端口 1024 ~4999：可以用作任意客户的端口；

5）端口 5000 ~65535：可以用作用户的服务器端口。

另外 UDP 还有一些保留端口。

如果若干个不同的 BACnet 网络共同使用一个局域网，相当于每个 BACnet 网络是局域网中的一个广义节点时，要为每个 BACnet 网络分配一个不同的 UDP 端口。

B/IP PAD 技术实现的原理如图 5-4 所示。

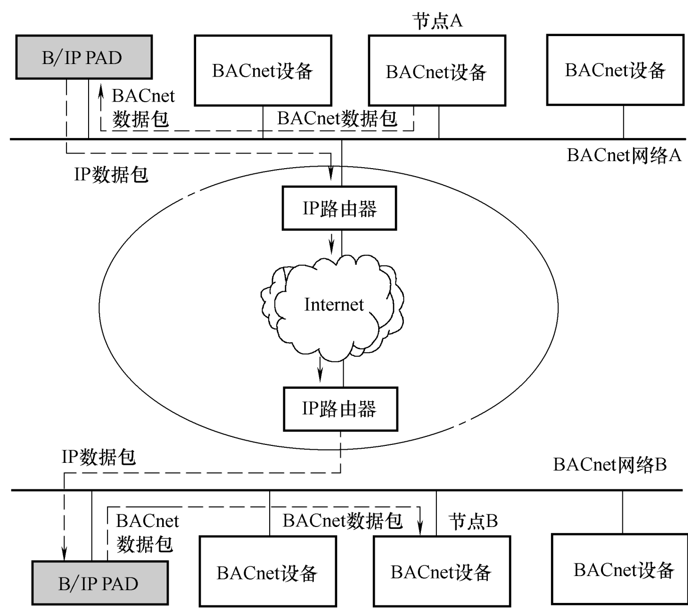


图 5-4　B/IP PAD 技术实现的原理

在 B/IP PAD 技术实现的原理图中，两个 BACnet 局域网通过 IP 网络实现了互联，PAD 环节既是 IP 网络节点又是 BACnet 网络的路由器设备节点，因此要同时为 PAD 分配一个 IP 地址和 BACnet 网络地址。

当 BACnet 网络 A 中的节点 A 通过 IP 网络与 BACnet 网络 B 中的节点 B 进行通信时，具体过程是：节点 A 向节点 B 发送 BACnet 数据包，该数据包首先通过 BACnet 网络 A 中的 PAD，当它接收到一个 BACnet 报文时，PAD 将该报文封装进一个 IP 数据帧中，给出 BACnet 网络 B 的 PAD 的 IP 地址，作为封装 IP 数据帧的目标 IP 地址，将此 IP 数据帧送上 IP 互联网。BACnet 网络 B 的 PAD 接收到封装有 BACnet 报文的 IP 数据帧后，从 IP 帧中取出 BACnet 报文，再传送给 BACnet 网络 B 中的节点 B。发送和接收报文的 BACnet 设备就是节点 A 和节点 B，两者之间与 PAD 通信就好像 PAD 是一个连接到 BACnet 网络上的普通 BACnet 路由器一样。使用 PAD 隧道传输技术还可以在将数据包发往远端的目标节点之前，PAD 设备可以修改数据包，还可以对 BACnet 数据包进行加密，提高 BACnet 网络通信的安全性。

从两个 BACnet 网络中的节点设备进行数据通信的过程来看，将两个网络互联的 IP 网络对于所有非 B/IP PAD 的 BACnet 节点是透明的，这些 BACnet 设备会将整个 BACnet 互联网中的 BACnet 设备都看成是在一个单独的 BACnet 网络节点。PDA 具有上述的“封装/拆装”功能外，还具有“路由”功能，因此每一个 PAD 都是一个特殊的 BACnet 路由器，同时又是一个 IP 网络中的节点，能够接收处理和发送 IP 数据包。从 IP 网络通信的机制来讲，PAD 在封装 BACnet 报文时，首先要确定目标 BACnet 网络 PDA 的 IP 地址，因此要在 PDA 中建立一个路由表。PAD 路由表中的路由信息应包括：

1）IP 网络所连接的目标 BACnet 网络号和 UDP 端口；

2）目标 BACnet 网络 PAD 的 IP 地址；

3）到达目标 BACnet 网络的第一个 IP 路由器的 IP 地址。

可以对 PAD 进行两种配置：第一种是 PAD 只使用一个物理网络连接通信端口，BACnet 报文和 IP 数据帧都能通过同一个端口进行通信，为了将 IP 数据帧传送给目标 BACnet 网络的 PAD，要求在网络中配置一个 IP 路由器；第二种 PAD 配置方法是：对于 BACnet 报文和 IP 数据帧使用

不同的连接通信端口。IP 端口直接接入 IP 互联网，PAD 等效为一个通过 IP 网络进行通信的设备。

如果将 PAD 看作是 BACnet 网络的一个节点设备，它的功能就是一个 BACnet 路由器，当它接收到一个 BACnet 报文时，再通过若干个 PAD 依次接收转发直至 BACnet 网络目标节点。如果多个 BACnet 网络是通过 IP 网络互联的，当一个 PAD 接收到一个 BACnet 报文，信宿是一个远程 BACnet 网络，必须要通过 IP 网络来传输，PAD 将该报文封装进一个 IP 帧中，给出信宿 BACnet 网络中对应 PAD 的 IP 地址，作为 IP 帧的目标 IP 地址，送上 IP 网络传输。信宿 BACnet 网络的 PAD 从 IP 帧中取出 BACnet 报文，将其传送给位于本地网络中的目标设备。发送和接收报文的 BACnet 设备从报文传递和通信的过程中，感受不到 IP 网络的存在。

PAD 与 BACnet 路由器在处理全局广播的方式方面也是不同的：对于广播报文来讲，BACnet 路由器的处理方式是：将发送给路由表中所有的网络，但不包括信源 BACnet 网络；PAD 处理的处理方式是：向每一个对等 PAD 发送一个包含 BACnet 报文的 IP 帧，这就要求 PAD 保持一个对等 PAD 的 IP 地址表。

使用 B/IP PAD 隧道技术可以构建一个较为安全的网络系统。PAD 在将 IP 帧发往远端信宿节点前，可以修改 IP 帧中包含的 BACnet 报文并进行加密。用 PAD 组建 BACnet 互联网的工作原理如图 5-5 所示。

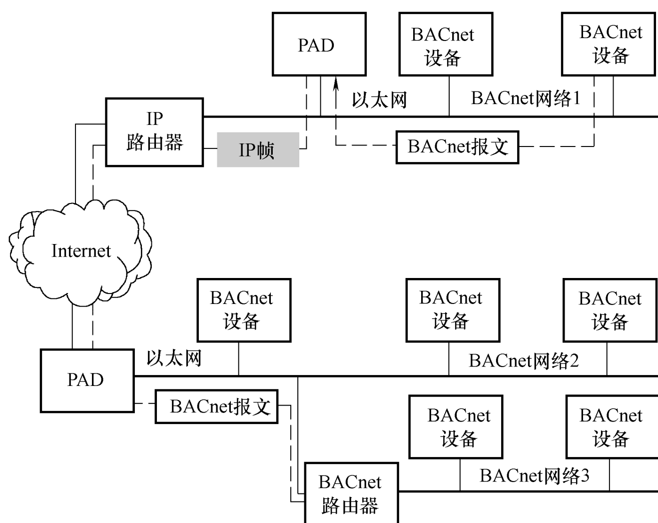


图 5-5 用 PAD 组建 BACnet 互联网

在图 5-5 中，网络 2 和网络 3 通过一个 BACnet 路由器互联成有更大覆盖区域的 BACnet 网络，这里就是 BACnet 互联网。这里要注意 PAD 的两种不同配置方式：第一种配置情况是在 BACnet 网络 1 中的 PAD 通过同一个物理网络连接端口，接收 BACnet 报文和发送 IP 帧，所以要配置一个 IP 路由器；第二种配置情况是 PAD 通过两个不同的连接端口分别传输 BACnet 报文和 IP 帧。IP 端口（RJ-45 口）可以直接接入 IP 网络，互联网就是最大的 IP 网络。

5.3 BACnet/IP 网络

在 BACnet 标准附件 H 中描述了 B/IP PAD 隧道技术，该技术的情况上面做了介绍；在 BACnet 标准附件 J 中，描述了 BACnet/IP 网络技术，该技术中的设备称为 BACnet/IP 设备，作用是直接将 BACnet 报文封装进 IP 帧中进行传输。

5.3.1　BACnet/IP 互联网

1. BACnet/IP 体系结构

使用 PAD 设备实现在 IP 网络上互联 BACnet 网络尽管较为简单，但存在着一些不容易克服的缺点，其中之一是，不容易从网络中增删设备。如果要对 BACnet 网络进行重构，必须重新改写每一个 PAD 中的对等 PAD 设备表。为了能够更便利地利用 IP 网络实现 BACnet 网络的互联，以及克服直接利用 UDP/IP 难于对 BACnet 网络中的广播通信机制进行控制和管理的不足，同时实现动态增减 BACnet 设备的功能，常设标准方案 135 委员会（SSPC135）在 PAD 基础上改进、开发了新的互联协议，称为 BACnet/IP，简称 B/IP，作为附件 J 加入到 BACnet 标准中。ASHRAE 于 1999 年 1 月正式发布附件 J 作为 BACnet 标准的附件，成为美国国家标准。附件 J 详细规范了使用 TCP/IP 通信的设备组建 BACnet 网络的技术，并且将这种网络称为 BACnet/IP 网络，简称 B/IP。

在新的 BACnet/IP 互联协议中，B/IP 路由器的主要作用就是直接将 BACnet 报文封装进 IP 帧中进行传输。重新定义了一个微协议层（Micro Protocol Layer）。该微协议层称为 BACnet 虚拟链路层，简称 BVLL，位于 BACnet 网络层与 IP 之间，其作用是进行 BACnet 广播管理，并提供向其他通信协议扩展的扩展机制。同时，为了充分利用 IP 协议栈，使用 IP 用户数据报（UDP）进行 BACnet 报文传输。图 5-6 为这种扩展方式的体系结构图，该体系结构图即 BACnet/IP 体系结构。

在 BACnet/IP 的体系结构中，IP 之上使用 UDP，UDP 层的作用是将来自 BVLL（BACnet Virtual Link Layer，BACnet 虚拟链路层）的数据封装成 IP 数据包，也将收到的 IP 数据包拆开，提取其中的相关数据给 BVLL。

在此处使用 UDP，可以避免重新定义新类型的 IP 包，又可以利用现有的 IP 网络建立 BACnet 网络。如果重新定义一个新类型 IP 包，则会因为 IP 路由器不能识别自定义的数据包将其简单丢弃，而加入传输层则可以利用端口机制进而扩展。选用 UDP 而不是 TCP 主要因为 TCP 不能实现“一对多”的广播，而且 BACnet 的应用层提供了可靠传输机制并提供了报文分段功能，这些都同 TCP 类似。如果在 BACnet/IP 中使用 TCP，就在同一体系结构中同时存在两套互相独立的确认机制，这还会使得整个 BACnet/IP 网络由于传输开销过大而效率降低。

2. BACnet/IP 网络

BACnet 标准附件 J 对 BACnet/IP 网络的定义是：BACnet/IP 网络是由一个或者多个 IP 子网组成的集合，其中整体具有一个单独的 BACnet 网络号。

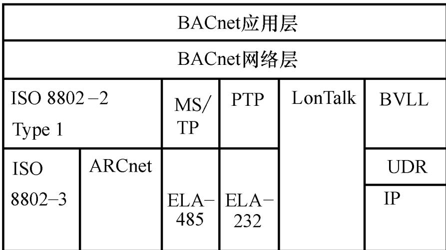


图 5-6　BACnet/IP 体系结构

BACnet/IP 规范的内容有 7 个部分：

1）定义和描述由一个或者多个 IP 子网组成的 BACnet 网络的概念。

2）定义和描述了使用 BACnet 非确认服务进行在 BACnet/IP 网络和非 BACnet/IP 网络之间的本地、远程和全局广播的管理。

3）定义了 BACnet 广播管理新设备（BBMD），用来进行广播管理。

4）定义了一个 BACnet 虚拟链路层（BVLL）新的协议层，实现 BACnet/IP 网络通信。

5）定义了“外来”设备接入 BACnet/IP 网络的方法。

6）规定了在 BACnet/IP 网络和非 BACnet/IP 网络之间的路由。

7）规定了多个 BACnet/IP 网络之间的路由。

BACnet/IP 网络是由一个或者多个具有 IP 域名的子网组成的、具有一个单独的 BACnet 网络

号的集合网络。BACnet 互联网由两个或者多个 BACnet 网络组成，这里的 BACnet 网络是 BACnet/IP 网络，如 BACnet 的以太网、ARCnet 网络、MS/TP（主从/令牌传递）网络和 LonTalk 网络。BACnet/IP 能够比 PAD 设备更有效地处理在 IP 网络上进行 BACnet 广播传输。BACnet/IP 允许设备从 Internet 的任意接入点接入系统，能够有效地利用 Internet 或广域网、城域网作为 BACnet 局域网。

采用 BACnet/IP 体系结构的 BACnet 网络就是“BACnet/IP”网络，由一个或多个 IP 子网组成，并且每一个 BACnet/IP 网络只有一个 BACnet 网络号。当多个 BACnet/IP 网络或 BACnet 网络通过 BACnet 路由器连接时，就形成了一个 BACnet/IP 网络，如图 5-7 所示。

在图 5-7 中，IP 子网 A 和 IP 子网 B 组成了一个 BACnet/IP 网络。与使用 PAD 组成 BACnet 互联网不同，网络的物理拓扑结构形式上基本类同，只是将 PAD 设备换成了 BBMD（BACnet Broadcast Management Device，BACnet 广播管理设备），并增加了一个称为“外部 BACnet 设备（foreign BACnet Device）”的 BACnet 设备。BACnet/IP 网络中 BACnet 设备既是 BACnet 网络中的节点，同时也是 IP 网络中的节点，任意两个 BACnet 设备均可以直接进行“一对一”通信，或单播通信，无需经过封装和拆装的端到端处理。图 5-7 中的两个 IP 子网有各自不同的 IP 子网号，两个 IP 子网 IP 路由器和 Internet 组成一个 BACnet 网络，并有一个且只有一个 BACnet 标识号。

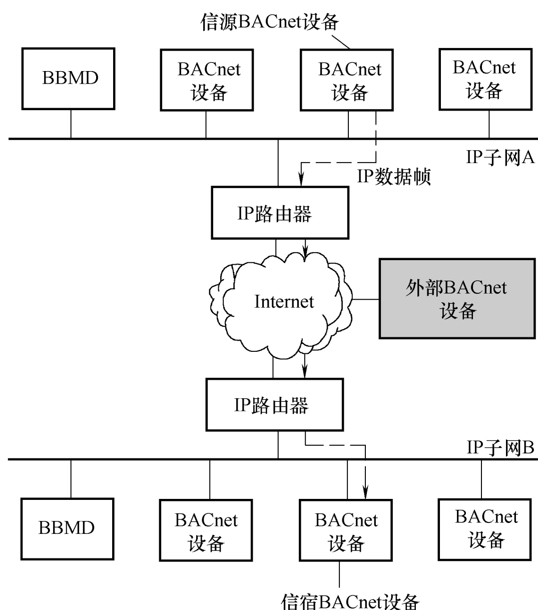


图 5-7 BACnet/IP 网络

在 BACnet/IP 网络中，BBMD 是 BVLL 协议定义的关键设备，BVLL 协议规定了 BACnet/IP 网络中的每一个 IP 子网仅有一个 BACnet 广播管理设备（BBMD 设备），负责注册外部 BACnet 设备，并对 BACnet 的广播通信过程进行协调管理，使 BACnet/IP 网络中的所有 BACnet 设备均可以进行 BACnet 广播。

BACnet 广播管理设备 BBMD 使用广播路由表（Broadcast Distribution Table，BDT）管理 BACnet/IP 网络内的广播通信机制，使用外部设备表（Foreign Device Table，FDT）实现对外部设备的注册和广播。

外部 BACnet 设备是指在 BACnet/IP 网络以外的 IP 子网中接入的 BACnet 设备，就是说外部 BACnet 设备所接入的 IP 子网不是组成 BACnet/IP 网络的组成部分。但是外部 BACnet 设备可以作为一个“移动的 BACnet 网络节点”随时方便地与 BACnet/IP 网络互联，成为 BACnet/IP 网络中的节点。因此外部 BACnet 设备被定义了这样的功能：能够随时接收来自 BACnet/IP 网络的广播，也可以主动向 BACnet/IP 网络进行广播，即外部 BACnet 设备和 BACnet/IP 网络之间可以实现双向广播通信。

3. BACnet/IP 网络报文格式

BACnet/IP 网络报文格式如图 5-8 所示。在网络报文格式结构图中，各个不同域的意义如下：

1）MAC 媒体访问控制域是下层网络帧的地址。

2）BIP 域分为两部分，前面一部分是 20B 的标准 IP 数据报的头部固定部分，包含有各 4B

的信源节点 IP 地址和信宿节点 IP 地址，如图 5-9 所示。后面一部分是 8B 的标准 UDP 数据段的头部，包含有各 2B 的源和目的 UDP 端口号。

3）BVLCI（BACnet Virtual Link Control Information，BACnet 虚拟链路控制信息）域是 BACnet 虚拟链路控制信息域。

4）NPCI（Net Protocol Control Information，网络层协议控制信息域）。

5）APDU（Application Protocol Data Unit，应用层协议数据单元）。

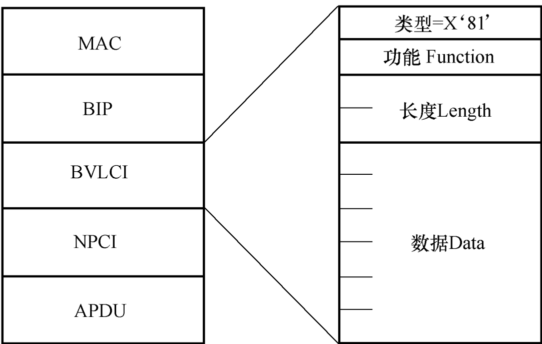


图 5-8　BACnet/IP 网络报文格式

从 IP 网络的网络层来看，BACnet/IP 网络报文是一个 IP 数据报，从 IP 网络的传输层来看，BACnet/IP 网络报文又是一个 UDP，因此 BACnet/IP 网络报文可以在 IP 网络中顺畅地传输。IP 数据报、UDP 用户数据报的关系如图 5-10 所示。

每个 BACnet/IP 设备都具有一个 IP 地址，是一个 IP 网络设备，而它的上层应用又是按照 BACnet 协议进行组织的，可以与其他的 BACnet 设备进行数据“对话”。

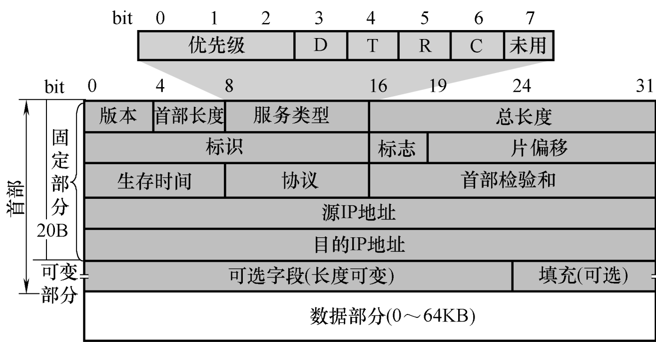


图 5-9　IP 数据报格式

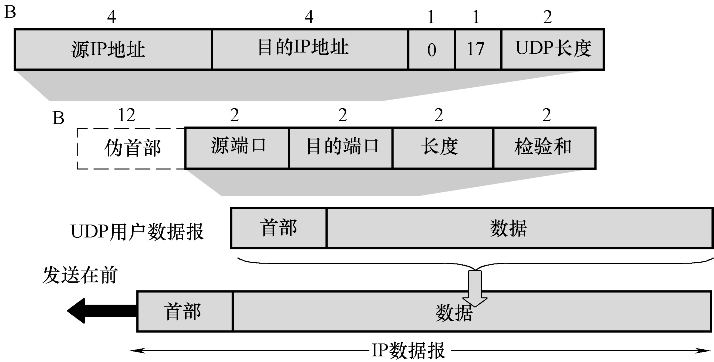


图 5-10　UDP 数据报和 IP 数据报的关系

BACnet 与 Internet 的两种互联技术：PAD 技术和 BACnet/IP 技术，这两种技术各有优缺点。前者是一种异构网络互联技术，应用比较普遍，后者可以是实现 BACnet 与 Internet 的无缝连接，具有良好的扩展性。BACnet 互联网是由两个或者多个 BACnet 网络所组成的网络。由于 IP 网络的出现，各种 BACnet 网络互联非常灵活，各种 BACnet 设备均可以在 IP 环境中实现互操作，但

是 PAD 和 BACnet/IP 设备之间不能直接通信，这是构建 BACnet 互联网时的基本原则之一。

5.3.2　BVLL 协议

1. BVLL 协议的功能

在 IP 网络中，UDP 是传输层协议，IP 是网络层协议，BVLL 的功能就是在 UDP 之上实现对 BACnet 广播的管理和 BACnet 设备的动态管理。借助于 BVIL 还可以扩展和提高 BACnet 应用系统的通信能力；帮助 BACnet 标准更好地融合先进和处于主流应用状态的其他通信协议。

如前所述，BACnet/IP 网络中的每一个节点都是 IP 节点，所以网络中的所有节点都可以进行点对点的单播通信。由于网络层除了 IP 外，还包括 Internet 控制报文协议（ICMP）、Internet 组管理协议（IGMP）、地址解析协议（ARP）、反向地址解析协议（R ARP）、IP 路由选择协议等，其中 IGMP 能够实现 D 类 IP 地址为信宿节点地址的组播。D 类 IP 地址就是组播地址，即在 244.0.0.0 ~ 239.255.255.255 范围内的每个 IP 地址。实际上，IP 网络为了放置网络拥塞通常不支持广播方式通信，于是 IP 网络就不能满足 BACnet 标准要求的各种广播功能，为了解决这个问题，在 BACnet 网络层与 IP 协议簇之间定义了一个中间协议层，目的是既不影响原有协议的功能，又可以通过和原有协议的缓冲中间层实现协议内容的对接，支持广播功能，这就是 BVLL 协议的功能。

2. BVLL 协议的报文结构和组成域

（1）BVLL 协议的报文结构

BACnet 虚拟链路层 BVLL 协议定义了 BVLC（BACnet Virtual Link Control，BACnet 虚拟链路控制）报文和交换规程；BVLL 协议还定义了 BACnet 广播管理设备（BBMD）、外部 BACnet 设备（FD）和 BACnet/IP 路由器等 BVLL 协议设备以及在 IP 网络环境中的 BACnet 广播和外部 BACnet 设备的动态管理。

BVLL 协议都包含 4 个域：类型（Type）域、功能（Function）域、总长度（Length）域和用户数据（User Data）域。其中类型（Type）域、功能（Function）域和总长度（Length）域构成 BVLL 报文的报文头，报文头数据量固定为 4B，如图 5-11 所示。

（2）BVLL 协议的报文组成域

BVLL 协议的报文由 BVLL 协议报文头和用户数据组成，BVLL 协议报文头有 3 个域，分别是：类型域、功能域和长度域。

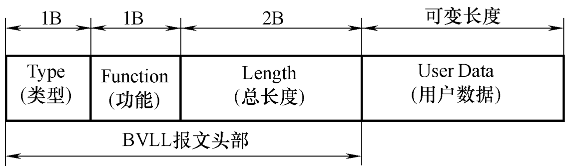


图 5-11　BVLL 协议报文结构

1）类型域：BVLL 协议报文头的第 1 个域为类型（Type）域，仅 1B，用来说明传输 BACnet 报文使用的通信协议类型。在 BACnet/IP 网络中，类型域取值为 X“81”，表示传输 BACnet 报文的通信协议是 IPv4。

2）功能域：BVLL 协议报文头的第 2 个域为功能（Function）域，宽度 1B，使用 12 种协议功能，分别编号为 0 ~ 11，对数据传输进行管理。

3）长度域：BVLL 协议报文头的第 3 个域为长度（Length）域，用来表示协议报文的总长度，长度域的值 = BVLL 协议报文头长度 + 用户数据长度 = 4B + 用户数据长度的字节数。

4）用户数据域：BVLL 协议报文的第 4 个域就是数据域（User Data），即用户数据域。数据域宽度是变长的。在 BVLL 协议报文中，用户数据就是网络层协议数据单元（Net Protocol Data U-nit，NPDU）。

在 BACnet/IP 报文传输处理过程中的数据单元及头部、报文及头部如下：

1）APDU（应用层协议数据单元）：由 APCI 和用户数据组成。

2）APCI（应用层协议控制信息）：APCI 包含进行应用层协议操作所需的数据，包括 APDU 的类型、匹配服务请求和服务响应的信息，以及重组分段报文的信息。

3）NPDU（网络层协议数据单元）。

4）NPCI（网络层协议控制信息）。

5）BVLL（BACnet 虚拟链路层）报文。

BACnet/IP 报文处理流程如图 5-12 所示。

BACnet/IP 网络报文格式中的 BIP 域如图 5-13 所示。

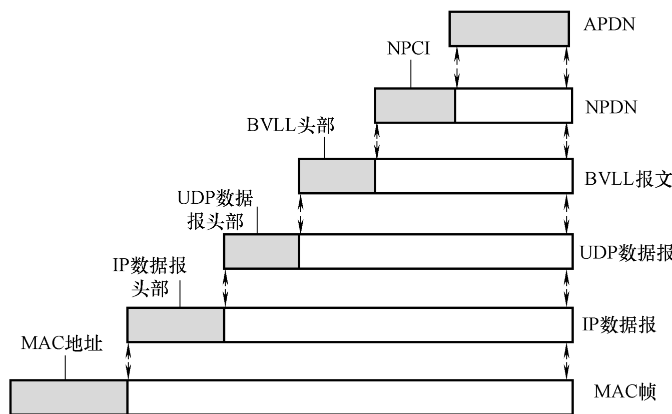


图 5-12　BACnet/IP 报文处理流程

在 BACnet/IP 网络中，由 4B 的 IP 地址和 2B 的 UDP 端口号组成的地址和端口号的组合，作用相当于 MAC 地址，用于 BACnet/IP 网络中设备之间的通信。用于单播报文和广播报文的默认 UDP 端口是 X’BAC0’，BACnet/IP 网络中的设备支持这个端口。BACnet/IP 网络报文的格式中的 BIP 域还可以用图 5-13 表示。BIP 域由 IP 域和 UDP 域组成，前面一部分是 20B 的标准 IP 数据报的头部，包含有各 4B 的信源和目的 IP 地址，后面一部分是 8B 的标准 UDP 数据报头部，包含有各 2B 的信源和目的 UDP 端口号。每个网络层协议数据单元（NPDU）都用第一个字节来表示 BACnet 协议版本号。NPDU 中第二个字节是一个控制字节，表示是否存在网络层协议控制信息（NPCI）域。

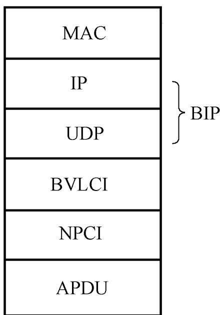


图 5-13　BACnet/IP 网络报文格式中的 BIP 域

在 BACnet/IP 中使用 UDP 数据报作为虚拟链路层数据报，从而实现基于 TCP/IP 的 BACnet 与 Internet 的无缝互联。

（3）BVLL 协议报文头功能域定义的不同功能类型 BVLL 报文

BVLL 协议报文头中的功能域可以定义 12 种功能类型 BVLL 报文：

1）BVLC-Result（Function＝0）类型；

2）Write-Broadcast-Distribution-Table（Function＝1）类型；

3）Read-Broadcast-Distribution-Table（Function＝2）类型；

4）Read-Broadcast-Distribution-Table-Ack（Function＝3）类型；

5）Forward-NPDU（Function＝4）类型；

6）Register-Foreign-Device（Function＝5）类型；

7）Read-Foreign-Device-Table（Function＝6）类型；

8）Read-Foreign-Device-Table-Ack（Function＝7）类型；

9）Delete-Foreign-Device-Table-Entry（Function＝8）类型；

10）Distribute-Broadcast-To-Network（Function＝9）类型；

11）Original-Unicast-NPDU（Function＝10）类型；

12）Original-Broadcast-NPDU（Function＝11）类型。

位于 BACnet 网络层与 IP 层之间的微协议层 BVLL，其作用是提供在 BACnet 网络层与通信协议 UDP 之间的接口机制，在 NPCI（网络层控制信息）和 BACnet/IP 报文（IP 报头＋UDP 报头）增加了 BACnet 虚拟链接控制信息（BVLCI）报文，进行 BACnet 广播管理，以及提供向其他通信协议扩展的扩展机制。

网络层控制信息（NPCI）的结构组成见表 5-1。

表 5-1　NPCI 的结构组成

版本	1B
控制	1B
DNET(目标网络号)	2B
DLEN(目标 MAC 地址的长度)	1B
DADR(目标 MAC 地址)	可变字节
SNET(源网络号)	2B
SLEN(源 MAC 地址的长度)	1B
SADR(源 MAC 地址)	1B
Hop Count(转发计数)	1B
报文类型	1B
Vendor ID(生产商表示符)	2B

APDU 由协议控制信息（PCI）和用户数据两部分组成。APCI 包含进行应用层协议操作所需的数据，“用户数据”包含请求和响应的具体信息。

5.3.3　BBMD 和 FD

1. BBMD 和 FD 的广播通信

BVLL 协议定义和使用了“注册”机制，通过这种机制使 FD 参与 BACnet/IP 网络的广播通信。在 BACnet/IP 网络中，BBMD 是 BVLL 协议定义的关键设备，BVLL 协议规定，BACnet/IP 网络的每个 IP 子网有且仅有一个 BBMD，用于注册外部 BACnet 设备，并实现 BACnet 广播机制，使 BACnet/IP 网络中的所有 BACnet 设备均可以进行 BACnet 广播，BBMD 通过广播路由表（Broadcast Distribution Table，BDT）管理 BACnet/IP 广播，通过外部设备表（Foreign Device Table，FDT）实现对外部设备的注册和广播。

BBMD 在进行读数据值、传输文件或者其他的设备之间进行通信时，可以在 IP 中直接传输报文。但 IP 网络本身并不支持 BACnet 类型的广播，BACnet/IP 提供了 2 个在 IP 网络中进行 BACnet 广播的方法。第一个称为组播（multicast），第二个称为 BACnet/IP 广播管理设备。组播是一种特殊类型的广播，它标明了那些接收报文的设备。一个组播报文有一个特殊形式的目标地址，称为组播地址。组播报文通过 IP 网络传输，只有被标明组播地址的设备才能够接收和处理组播报文。

所有参与 BACnet/IP 广播活动的 FD 必须向 BACnet/IP 网络的某个 BBMD 进行注册，经过注册在 BBMD 处建立相应的 FDT。当 BACnet/IP 网络进行广播通信时，注册的 BBMD 用单播方式向 FD 发送广播信息，如图 5-14 所示。而当 FD 向 BACnet/IP 网络进行反向广播时，FD 将发送的广播报文用单播方式首先发送给进行注册的 BBMD，这里的 BBMD 担当着 FD 管理者的角色，再由该 BBMD 完成其他的 BACnet/IP 网络广播，如图 5-15 所示。

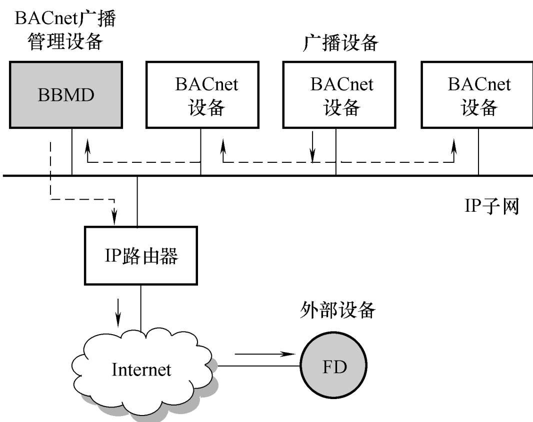


图 5-14　BBMD 用单播的方式向外部设备发送广播信息

每个包含有若干个 BACnet/IP 设备的子网都必须有一个 BBMD。一个 IP 子网中的 BACnet/IP 设备如果要向另一个 IP 子网（目标 IP 子网）发送一个 BACnet 广播报文，发送报文的 BACnet/IP 设备首先将报文传送给设备所在 IP 子网中的 BBMD，再由 BBMD 将报文通过 IP 网络传送到目标 IP 子网，当这些 BACnet 广播报文到达目标子网后，再用广播方式发送给子网内的其他 BACnet/IP 设备。

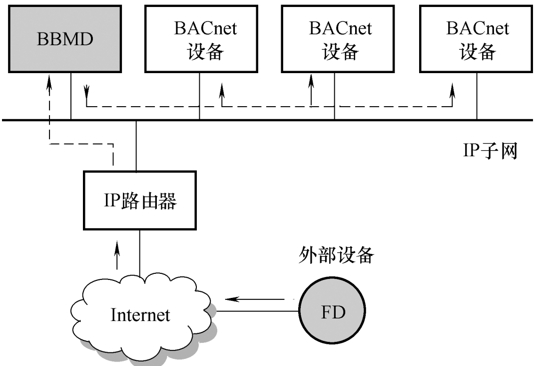


图 5-15　FD 向远程 IP 子网广播发送报文

BBMD 可以使用两种方法将一个 BACnet 报文广播传送给另一个远程 IP 子网，第一种方法叫直接广播方法（也称为一跳法），另一种方法是二跳法。在直接广播方法中，BACnet 广播报文有一个目标 IP 子网地址，通过 IP 路由器向该目标 IP 子网广播发送报文。如果负责向接收报文的目标 IP 子网转送报文的 IP 路由器不具备广播功能，就要使用二跳法：首先将报文广播发送到目标 IP 子网中的对等 BBMD 中，然后再由这个 BBMD 在目标 IP 子网中广播发送。

2. BBMD 和 BDT

BVLL 协议的主要功能是实现两大类 BACnet 广播管理，第一类是对 BACnet/IP 网络中所有 IP 子网进行广播通信的管理，第二类是对 FD 向 BACnet/IP 网络中的目标 IP 子网中的其他 BACnet/IP 设备进行广播通信的管理。

要实现对 IP 子网广播的管理，就必须在每个 IP 子网上配置一个 BBMD 并设置相应的 BDT；要实现对 FD 广播的管理，就必须提供 FD 注册功能，并设置对应的 FDT。

BDT 由 BACnet/IP 网络的所有子网表项组成，每个 IP 子网表项有 10B。其中，6B 用来表示 BBMD 的 BACnet/IP 地址，4B 用于表示广播路由掩码。广播路由掩码的形式和作用相当于 IP 中

的 IP 子网掩码，可以用来选择和判断 IP 子网的广播方式（“一跳”方式或“二跳”方式）。BBVL 协议要求 BACnet/IP 网络中所有 BBMD 的 BDT 均应相同。

IP 路由器支持“一跳”广播方式的报文传输情况如图 5-16 所示。在图 5-16 中，设定 IP 子网 B 中的 IP 路由器具备广播功能，IP 子网 A 中 1# BACnet 设备向 IP 子网 B 中的所有 BACnet 设备发送广播报文的过程如下：首先将报文送给子网内的 BBMD，再由该 BBMD 将报文转发给 IP 子网 A 的 IP 路由器（2#IP 路由器），报文通过互联网到达具备广播功能的 IP 子网 B 的 IP 路由器（3#IP 路由器），3#IP 路由器将报文广播发送到 IP 子网 A 中的所有 BACnet 设备。IP 子网 B 中的 BBMD 不再进行广播式发送，仅仅单独向注册过的 FD 转发广播报文。

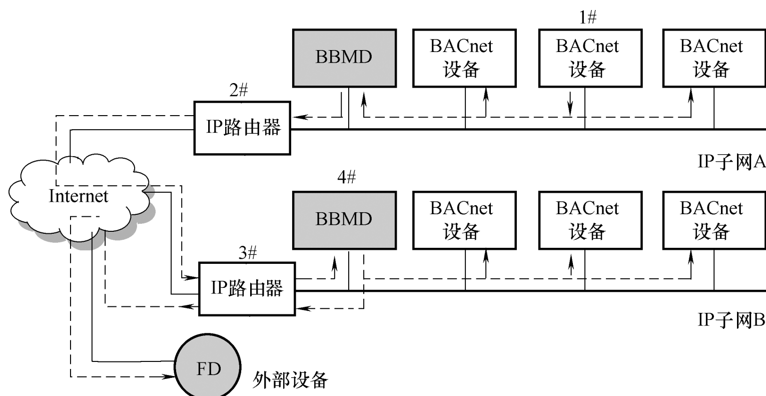


图 5-16　IP 路由器支持“一跳”广播方式的报文传输

当 IP 子网的 IP 路由器不支持广播方式通信的情况下，采用“两跳式”广播方式向 IP 子网内的 BACnet 设备广播发送报文的情况如图 5-17 所示。在图 5-17 中，1#设备是向外广播发送报文，首先经过 IP 子网 A 的 BBMD，再由该 BBMD 将报文送给本子网内的 IP 路由器转发到互联网上，报文到达目标 IP 子网 B 后，由于 IP 路由器不支持广播方式通信，因此还需将报文转发到子网 B 中的 BBMD，由 BBMD 通过广播方式将报文传送给 IP 子网内的所有 BACnet 设备。

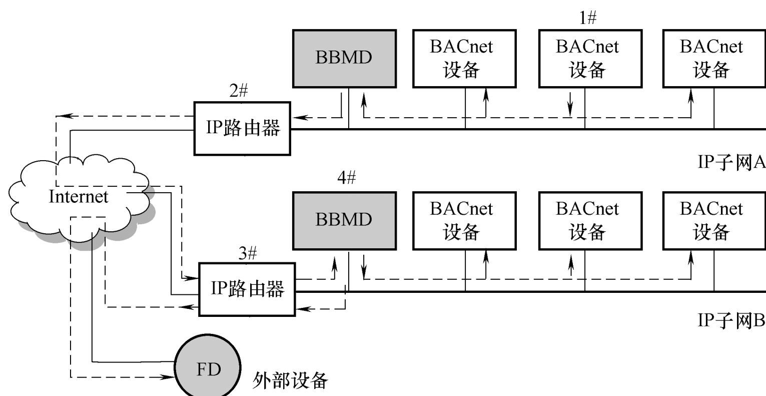


图 5-17　“两跳式”广播方式向 IP 子网内的 BACnet 设备广播发送报文

某 IP 子网中的 BBMD 要向其他 IP 子网传送广播报文时，首先根据目标 IP 子网在 BDT 中的表项内容，计算广播报文的目标地址，再确定是采用一跳法还是二跳法。确定广播报文目标地址的方法是：将目标 IP 子网掩码，再和其 BACnet/IP 地址进行逻辑或运算，这种情况和通常由子网掩码与 IP 地址进行以上运算来确定网络号、子网号以及主机号的情况是类似的，当计算结果中的主机地址全为 1 时，BBMD 采用一跳法，否则采用二跳法传送广播报文。不过这里要注意区

别：通常网络中进行子网划分时，主机地址一般不能由全 1 或全 0 的码元序列组成。当计算得到的主机地址全为 1 时，表示目标 IP 子网中的 IP 路由器是支持广播方式工作的。举例如下：在某 IP 子网中的 BBMD 要向一个 IP 子网转发广播报文，目标 IP 子网在 BDT 中 IP 子网项的 BBMD BACnet/IP 地址为 202. 11. 0. 3. 218，子网项掩码是 255. 255. 255. 0，采用上述的映射运算：

目标 IP 子网广播路由掩码：11111111 11111111 11111111 00000000

BACnet/IP 地址：　11001010 00001011 00000011 11100000

子网号

目标 IP 子网广播路由掩码取反：

00000000 00000000 00000000 11111111

目标 IP 子网广播路由掩码取反后再与 BACnet/IP 地址取“或”：

11001010 00001011 00000011 111 11111

主机地址

得到广播报文的目标地址是 202. 114. 3. 255，主机地址全为 1，说明目标 IP 子网中的 IP 路由器支持广播方式，可以确定采用一跳法传送报文。

3. FD 和 FDT

FD 与 BBMD 之间定义和建立了一种互操作机制，就是 FD 向 BBMD 进行注册，然后 BBMD 就具备对 FD 进行广播通信的管理功能。一个 FD 只向某一个 BBMD 进行一次注册即可，注册完毕后，就构成了一对一的注册、管理关系。

用于登记注册 FD 的表格项就是 FDT。当某一个 FD 向某一个 BBMD 注册时，就在该 BBMD 的 FDT 增加项记录。FDT 每项记录大小 10B，其中 6B 用来表示进行注册的 FD 的 BACnet/IP 地址，2B 表示 FD 注册的有效时限，还有 2B 用于表示 FD 注册有效的剩余时间。

5. 3. 4　BACnet/IP 网络互联及路由器

BACnet/IP 网络由 1 个或多个 IP 子网组成，并且每一个 BACnet/IP 网络只有 1 个 BACnet 网络号。

1. BACnet/IP 路由器

TCP/IP 网络是当前有线网络的主流技术，因此在 TCP/IP 网络基础上构建 BACnet/IP 网络有很大的优势，在 BACnet 网络中的管理层就使用 TCP/IP 网络，在现场控制层，为降低成本和满足控制网络的实时性、可靠性需求，采用 ARCnet、MS/TP、LonWorks 等控制网络。在 BACnet/IP 互联网中，要使用 BACnet/IP 路由器来实现 BACnet/IP 网络和以上这些网络的互联。

两种不同的网络实现通信需要借助于网络互联的协议。将多个网络连接起来就组成互联网，连接互联网中各个不同网络的设备就是路由器，路由器要与两个或两个以上的网络连接。路由器在接收到一个报文时，需要确定是否要将这个报文转发到另一个网络中，因此它必须能够理解报文、报文分组及数据帧使用的协议。对于 BACnet 设备，协议就是 BACnet 协议，对于 IP 网络设备，协议就是 TCP/IP 互联网协议。协议定义了设备之间交换的报文、报文分组的格式、传输帧的格式，以及包含有信源地址及信宿地址及协议类型的封装格式。

BACnet 路由器必须要能够理解 BACnet 数据帧，IP 路由器必须能够释读和理解 IP 数据帧。

BACnet/IP 网络是通过 IP 网络互联的 BACnet 网络，面对 IP 网络的复杂性，BACnet 标准委员会的 IP 工作组制定了两种 BACnet/IP 网络互联标准方法和一种 BACnet/IP 路由器互联设备，并规定按这两种标准方法和配置进行的网络互联才符合 BACnet/IP 标准。

2. BACnet/IP 网络的互联

BACnet/IP 互联网在实际工程应用出现以下两种情况时，经常需要对 BACnet/IP 网络的规模

进行限制，同时实现多个 BACnet/IP 网络的互联。

第一种情况：BACnet/IP 网络的工作受流量限制，特别是受广播流量限制时，将一个 BACnet/IP 网络规划为多个 BACnet 子网，并为不同的 BACnet 子网分配不同的 BACnet 网络号。

第二种情况：对规模较大的 BACnet/IP 网络进行安全配置，需要将一个大 BACnet/IP 网络分割成多个 BACnet 子网并分配 BACnet 网络号。

将若干个 BACnet/IP 网络互联组建成一个能够实现互操作的 BACnet/IP 互联网，必须进行 BACnet/IP 网络互联。SSPC 的 IP 工作组制定 BACnet/IP 网络的两种互联方法都采用星形结构。星形结构具有流量瓶颈和风险集中的重大不足，但可以避免 BACnet/IP 网络多重路由，故选星形结构作为 BACnet/IP 网络互联的结构是业界公认合理的选择。

实现 BACnet/IP 网络互联的方式可以灵活地进行，一种使用 BACnet/IP 路由器实现 BACnet/IP 网络互联的情况如图 5-18 所示。

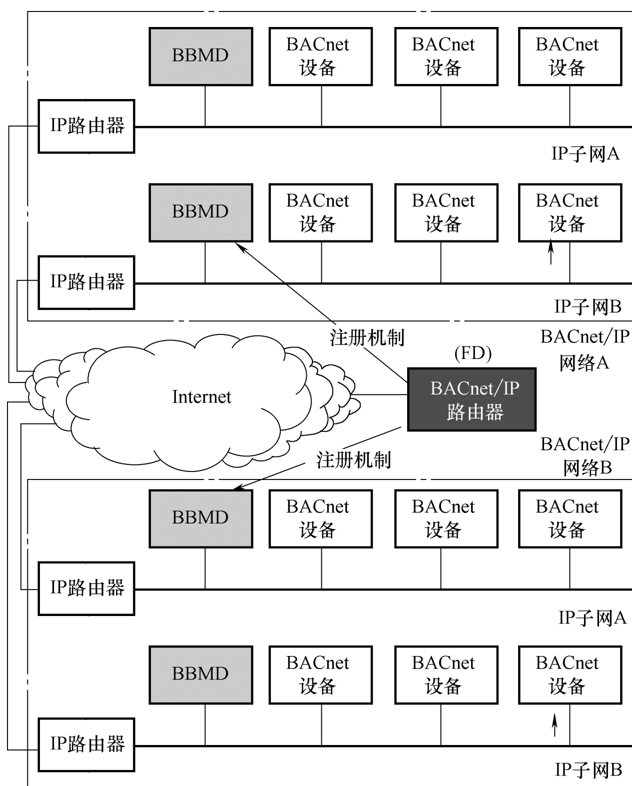


图 5-18　BACnet/IP 网络互联的情况

图 5-18 中的 BACnet 网络通过 IP 路由器和其他的 IP 子网互联，两个包含 BACnet 网络的 IP 子网构成分别通过 IP 路由器组成一个 BACnet/IP 网络，两个 BACnet/IP 网络再通过 Internet 互联。这里的 BACnet/IP 路由器既实现两个 BACnet/IP 网络的互联同时又相当于多个不同 BACnet/IP 网络的 FD，完全具备通过每个 IP 子网的 BBMD 注册的机制，发生的广播通信由 BBMD 管理。

还有一种实现 BACnet/IP 网络互联方式是：使用具有 BBMD 功能同时又具有 BACnet/IP 路由器功能的“BBMD/路由器”设备进行两个或多个 BACnet/IP 网络互联。这种情况如图 5-19 所示。

在使用“BBMD/路由器”设备实现 BACnet/IP 网络互联的过程中，“BBMD/路由器”设备作为 BACnet/IP A 的内部节点，通过向 BACnet/IP B 的 BBMD 注册实现广播通信的管理。

上述两种 BACnet/IP 网络互联方式，都是基于 BBMD 和 FD 之间的注册机制和逻辑互联来实

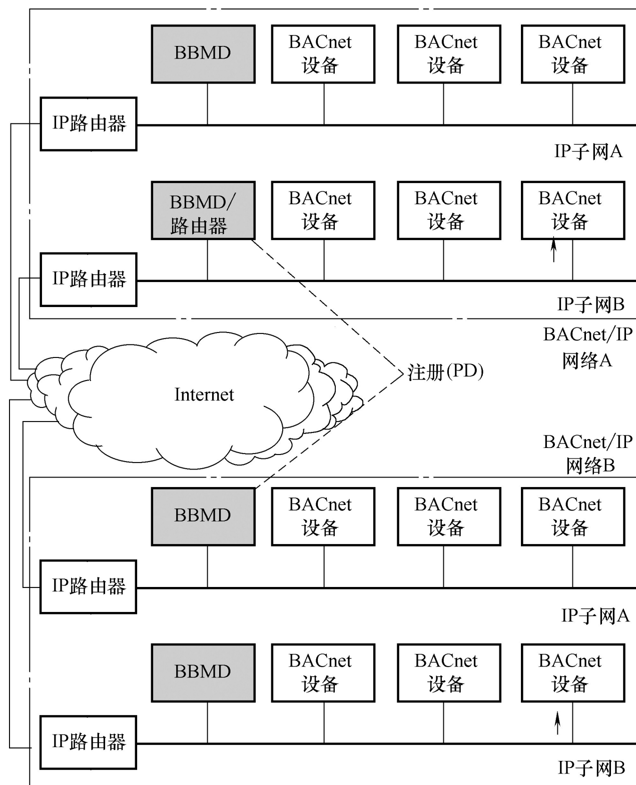


图 5-19　使用“BBMD/路由器”设备实现 BACnet/IP 网络互联

现的，因此 BACnet/IP 路由器与 BACnet 路由器是不完全相同的，BACnet 路由器仅有物理端口，采用整形量标识，而 BACnet/IP 路由器不仅有物理端口，还有逻辑端口，表示端口的方式是采用 BACnet/IP 地址。

5.3.5　BACnet/IP 和 BACnet 设备的混合网络

BACnet/IP 网络与非 BACnet/IP 网络互联，实质上是指由 BACnet/IP 和 BACnet 设备组成的混合网络。这里的非 BACnet/IP 网络特指基于原 BACnet 135—1995 定义的通信系统所构成的传统 BACnet 网络。

BACnet 路由器是 BACnet 网络互联设备，不同 BACnet 网络之间的信息交换都要经过 BACnet 路由器。如果一个 BACnet 网络中的设备和一个 BACnet/IP 网络设备公用一个物理网段（如以太网段），必须为 BACnet 网络中的设备和 BACnet/IP 网络设备分配不同的 BACnet 网络号，这两个网络间的设备要通过一个 BACnet/IP 路由器来互联，互联的结构如图 5-20 所示。

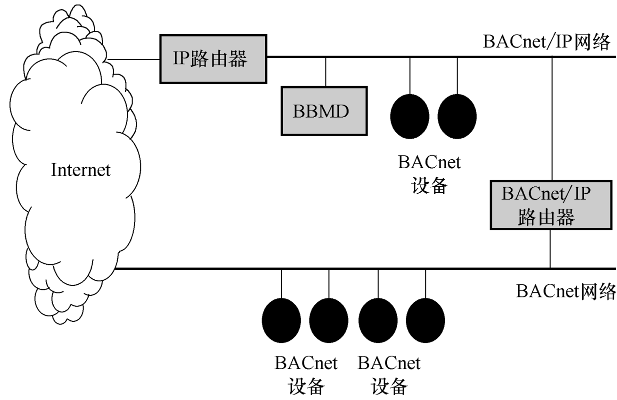


图 5-20　非 BACnet/IP 网络和 BACnet/IP 网络互联

BACnet、B/IP PAD 技术（隧道技术）和 BACnet/IP 是 BACnet 标准体系

中的 3 个子系列标准，综合使用这些子系列标准可以组建结构内容多种多样的 BACnet/IP 互联网和不同的网络组态。BACnet/IP 网络中可以同时有 BACnet、BACnet/IP 和 PAD 设备，这些设备在一个 BACnet/IP 网络中同时运行必须遵守以下规则：

规则一：BACnet 设备和 BACnet/IP 设备之间不能互相直接通信，彼此交换的报文要用一个 BACnet-BACnet/IP 路由器进行转发和路由才行，这里的 BACnet-BACnet/IP 路由器可以认为是一个广义的具有路由功能的网关。BACnet 设备 BACnet 网络中，BACnet/IP 设备在 BACnet/IP 网络中都必须有各自的 BACnet 网络号。

还有一个规则：BACnet/IP 设备不能直接与隧道技术中 PAD（协议包封装/拆装）设备进行通信，也要通过一个 BACnet-BACnet/IP 路由器连接实现通信。

一个由 BACnet/IP 设备和 BACnet 设备组成的混合网络结构如图 5-21 所示。

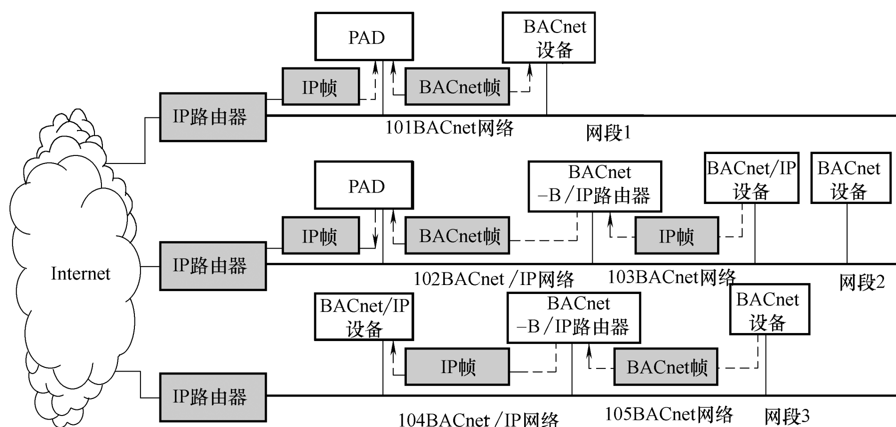


图 5-21　由 BACnet/IP 设备和 BACnet 设备组成的混合网络

图 5-21 中的网段 1 是一个 BACnet 网络，包含 BACnet 设备、PAD 和一个 IP 路由器，网段外部的 IP 帧经由 IP 路由器送至 PAD，再由 PAD 从 IP 帧中取出 BACnet 报文，将其传送给本网络中的 BACnet 设备。网段 2 由 BACnet 网络、PAD、BACnet/IP 网络、一个 BACnet B/IP 路由器、一个 IP 路由器、BACnet 设备和 BACnet/IP 设备组成。

图 5-21 中网络 101 和网络 103 是 BACnet 网络，通过隧道技术（PAD）与其他网络组成 BACnet 互联网，BACnet 网络中的设备向网络上发送的是 BACnet 报文。网络 102 和网络 104 是 BACnet/IP 网络，它们的设备向网络上发送的是 IP 帧，它们通过 IP 路由器可以直接连接到因特网中构成 BACnet 互联网。在网段 2 和网段 3 分别都同时存在 BACnet/IP 设备和 BACnet 设备，这两个网段分别都具有两个 BACnet 网络号，而它们各自中的两种设备之间进行数据通信时，需要有 BACnet-BACnet/IP 路由器进行互联。

图 5-22 给出了一种通过 BACnet/IP 网络与 BACnet 网络互联构成 BACnet/IP 互联网的情况。

图 5-22 中，有一个 BACnet/IP 网络 1，BACnet 网络 2，还有一个包括 BACnet/IP 虚拟网络和 BACnet 虚拟网络的混合网络，不管是 BACnet/IP 网络还是 BACnet 网络都有一个自己的 BACnet 网络号。BACnet/IP 网络中传输的是 UDP 数据包，BACnet 网络中传输的是 BACnet 报文。

图 5-22 给出了 BACnet/IP 网络和 B/IP PAD 网络互联构成的一个网络组态，在该组态中，一个 BACnet 网络和一个 BACnet/IP 网络通过 Internet 互联起来。在 BACnet 网络中，PAD 接收 BACnet 设备发送的 BACnet 报文，向 IP 路由器转发一个 IP 帧，将包含 BACnet 报文的 IP 帧传送到目的节点。从远端来的 IP 帧通过 IP 路由器将 UDP 报文传递给 PAD，PAD 在转化为 BACnet 报文传送给 BACnet 设备。

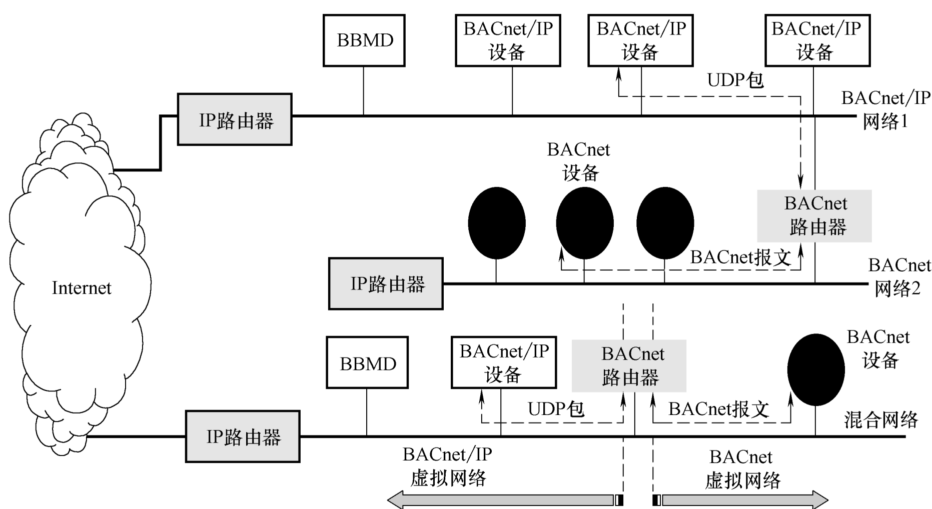


图 5-22　BACnet/IP 网络与 BACnet 网络互联

在图 5-23 中，BACnet/IP 网络中包括了一个 BBMD，在 BACnet/IP 网络的设备彼此之间使用 UDP 数据报传递数据，BACnet/IP 设备和 BACnet/IP 路由器双向传输 UDP 数据报；BACnet/IP 路由器和 PAD 之间双向传输 BACnet 报文；PAD 与 IP 路由器之间双向传输 UDP 数据报。如果网络中的某一节点要和 IP 网络远端的节点通信，通过 IP 路由器连入 Internet，实现通信。

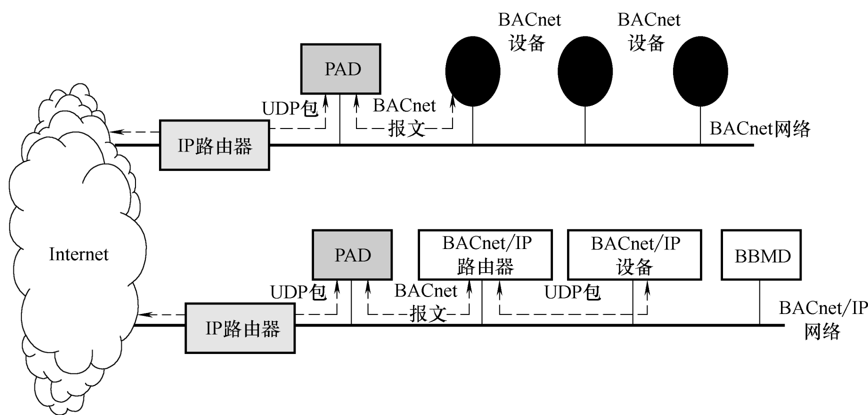


图 5-23　BACnet/IP 网络和 B/IP PAD 网络互联构成一个组态

第 6 章　BACnet 标准与 PTP 及 MS/TP 网络

BACnet 支持 6 种控制网络：Ethernet 、ARCnet 网络（2.5Mbit/s）、MS/TP 控制总线（76.8kbit/s）、BACnet/IP 网络、PTP（点对点）通信网络和 LonWorks 网络。除了使用的通信标准不同外，这 6 种楼宇自控网络的传输速率和系统组成成本也有较大的差异，如图 6-1 所示。

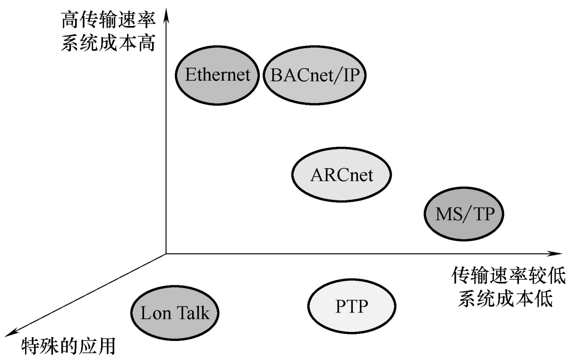


图 6-1　BACnet 支持的 6 种楼宇自控网络

BACnet 支持以太网作为控制网络。BAS 的管理层是以太网，如果控制网络也是以太网，就是使用通透以太网结构的 BAS，因此使用通透以太网结构的 BAS 严格地讲也是基于 BACnet 标准的 BAS。

6.1　MS/TP 控制总线

6.1.1　MS/TP 协议

MS/TP 作为 BACnet 数据链路层的一种选择，网络的工作具有很高的稳定性、实时性和可靠性，因此被广泛地应用于 BACnet 产品当中。BACnet 标准采用了 4 层结构：应用层、网络层、数据链路层和物理层，并为数据链路层和物理层提供了 6 种选择方案，其中一种就是选择主从/令牌传递（MS/TP）协议加上 EIA-485 标准。MS/TP 控制总线是一种混合网络，网络中存在主站点和从站点两种非对等的站点，并使用令牌媒质访问控制机制，令牌只能在主站点之间传递，主站点只有在持有令牌的条件下才能通过传输媒质发送数据帧，没有持有令牌的主站点只能处于接收和监听的状态。所有的主站点形成一个逻辑令牌环环路，尽管这个逻辑环路的物理路径可能较为复杂。当主站点持有令牌后最多发送 $N_{max_info_frames}$ 个数据帧后并等到了应答，然后将令牌传递给令牌环中的下一个主站点。

MS/TP 控制总线是一种典型的 BACnet 局域网，是 BACnet 标准自行定义的典型楼宇自控网络，这种网络实际上是数据量链路层上 MS/TP 通信协议与物理层的 EIA-485 控制总线的结合。

MS/TP 协议定义了 MS/TP 帧结构，这部分内容如第 4 章的“MS/TP 局域网规范”所述。MS/TP 协议还定义了 MS/TP 网络采用惟一的一种总线拓扑结构和主站点与从站点以及采用令牌机制的媒质访问控制方法。在媒质访问控制方法中，定义了令牌传递算法、新站点的插入算法、站点删除算法、多令牌检测算法、令牌产生算法和关于帧发送算法等。

6.1.2　MS/TP 控制总线的基本组网方式

美国艾顿 BACtalk BAS 的控制网络采用的是 BACnet MS/TP 控制总线，该总线将 DDC、协议转换器及符合 BACnet 标准协议的其他厂商的设备连接在一起。下面对使用 MS/TP 网络作为控制总线的基本组网方式做出说明。

BACtalk 系统中的 MS/TP 控制网络（也叫控制总线）的数据传输速率系列是 9.6kbit/s、19.2kbit/s、38.4kbit/s 以及 76.8kbit/s；网络结构是总线结构，当使用网络转发器时可成为星形结构；网络线缆是双绞屏蔽线。

网络连接长度最大 1071m；最大连接的设备按照设备的主或从的分类，网络最大可连接主设备 128 个，或者最大可连接 255 个主和从设备。

当网络连接长度超过 1071m 的距离时，可使用网络转发器。在两个设备之间最多可使用 3 个网络转发器；必须在网络总线的开始与结束端分别跨接 120Ω 1/4W（1 ± 5%）的电阻；网络线屏蔽接地采用单点接地的方式。网络连接时有正负极性的区别。

MS/TP 总线上连接的设备采用手拉手菊花链方式连接，在接入网络转发器后可采用星形结构。通信采用 RS-485 串行总线通信方式。使用 MS/TP 控制网络可以将 DDC 顺序地手拉手菊花链方式连接，如图 6-2 所示。

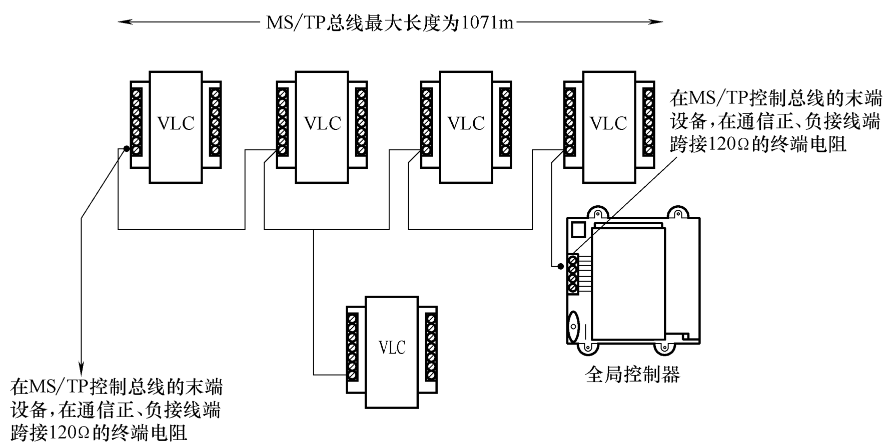


图 6-2　手拉手菊花链方式连接

网络线缆接线方式如图 6-3 所示。

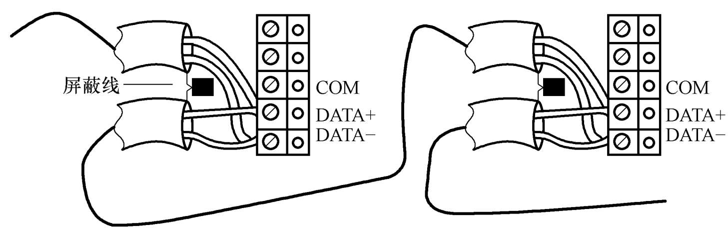


图 6-3　网络线缆接线方式

MS/TP 总线终端电阻接线方式如图 6-4 所示。

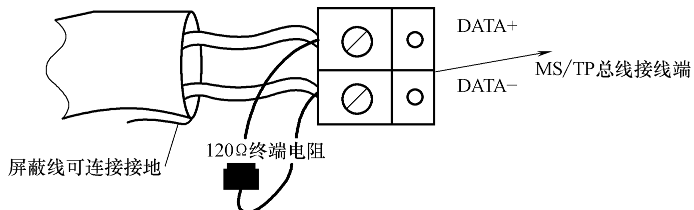


图 6-4　MS/TP 总线终端电阻接线方式

在 BACtalk 系统中，BACnet MS/TP 控制总线的线缆采用双绞屏蔽线，阻抗匹配阻值为 100 ~ 120Ω；分布式电容小于 100pF/m，屏蔽分布式电容小于 200pF/m。屏蔽采用铂纸或网状屏蔽。

使用 W221P-2254 或 W221P-1502，等同于美国线缆标准 AWG22 ~ AWG24。网络连接长度最大 1071m，不包含枝干部分的长度。

每一条 MS/TP 控制总线上最大连接的设备：按照设备的主或从的分类，网络最大可连接主设备 128 个，或者最大可连接 255 个主和从设备。

每段网络可连接的最大设备：根据设备的单位负载的计算，最大可连接 32 个单位负载的设备。

当超过 1071m 的距离时，可使用网络转发器，增加 MS/TP 控制总线的覆盖范围，两个设备之间最多使用 3 个网络转发器。

必须在网络总线（枝干不需要）的开始与结束端分别跨接 120Ω 1/4W（1 ±5%）的终端电阻；网络线屏蔽接地采用单点接地作为屏蔽接地的方式。

在 BAS 中，BACnet MS/TP 控制总线可以和其他控制域网络混合使用，这里所讲的混合使用是指：在一个基于 BACnet 标准的 BAS 中还可以使用其他不同的控制网络，如图 6-5 所示。

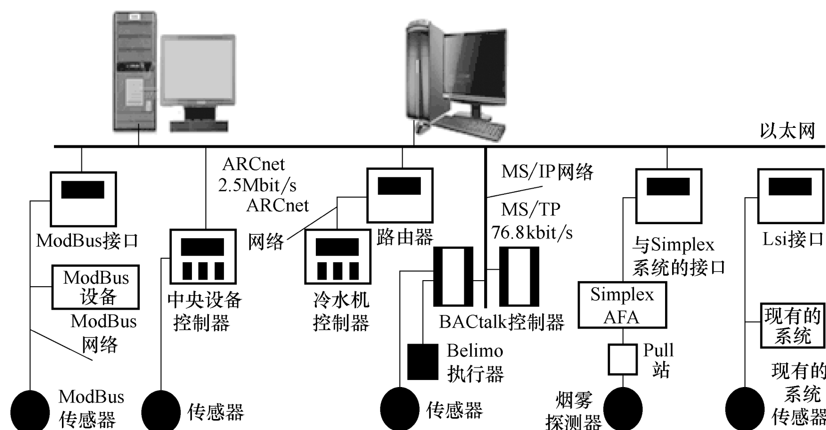


图 6-5　多种不同的控制网络共处于一个系统中

6.1.3　接收数据帧状态机和 Master 节点状态机

BACnet MS/TP 定义了 3 个有限状态机：第一个是 BACnet 接收数据帧状态机（BACnet Receive Frame Finite State Machine）；第二个是 BACnet Master 节点状态机（BACnet Master Node Finite State Machine）；第三个是 BACnet Slave 节点状态机（BACnet Slave Node State Machine）。

BACnet Slave 节点状态机比较简单，是 BACnet Master 节点状态机的一个子集，BACnet Slave 节点状态机主要用来处理不需要维护令牌环的设备，如 I/O 模块，外围设备如传感器、执行器，主要是作为其他提出服务请求设备的应答设备。

在 BACnet MS/TP 的 BACnet 接收数据帧状态机中，如果按照协议规定，是接收程序要一个一个字节地接收并解析，在 Firmware 级别的设备中，UART 会产生硬件中断，CPU 要处理的逻辑比较简单。这里的 firmware 是指固件，即设备内部保存的设备“驱动程序”，通过固件，操作系统才能按照标准的设备驱动实现特定机器的运行动作，比如光驱、刻录机等都有内部固件。UART（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter，是通用异步接收/发送装置），是一个并行输入成为串行输出的芯片。

在 BACnet MS/TP 主程序中，当主程序处理完接收数据帧状态机，就会进入 BACnet MS/TP 的 BACnet Master 节点状态机中，在 BACnet 接收数据帧状态机中会反馈接收状态，该状态会在 BACnet Master 节点状态机作为函数执行的一个判断条件。

BACnet MS/TP 的 BACnet Master 节点状态机的开发中，令牌（Token）的维护是非常重要的工作，该节点状态机的正常工作运行是其他 BACnet 设备通畅通信的基础，令牌（Token）维护不出问题，就不会造成令牌的频繁丢失。

6.1.4　BACnet 数据包接收、发送和提高 BACnet MS/TP 设备数据访问速度

1. BACnet 数据包接收

在 BACnet 数据包接收部分，要在串口配置参数时优化读写串口的 Timeout 参数。对于串口的异常，应用串口清理 API PurgeComm 及时进行串口清理动作。在数据处理过程中，无效的信息和运行时间都要监控，依据当前的系统波特率去动态调整各个参数使之优化配置。

2. BACnet 数据包的发送部分

对于 BACnet 数据包的发送，在 BACnet 数据包字节数不是很多的情况下，最好一次性地输出，防止 BACnet 接收设备在 BACnet 数据帧接收时序比较严格的情况下，认为该数据包无效而丢弃不处理。

在 BACnet MS/TP 的串口数据传输过程中，数据处理要进行预期的处理和判断，防止无效的数据过多影响后面的 BACnet 状态机的工作，造成 BACnet 设备 CPU 的 Loading 过高影响其他事务的处理过程。

3. 提高 BACnet MS/TP 设备的数据访问速度

BACnet MS/TP 采用的是令牌环网的媒质访问控制机制，这就造成 BACnet 设备访问上在特定时间内有 RS-485 总线被占用的情况。为了实现设备之间的快速访问，尽量使令牌环网能够高效率运行，有一种提高 BACnet MS/TP 环网高效运行的机制是：尽量把设备的 Station ID 设定为连续的，而且主要的令牌使用设备，如所有 BACnet 设备的参数配置，数据采集设备的 Station ID 设定为 0，这样就会得到一个高效的令牌环网。还有一个参数就是 Nmax-master 参数，如果 BACnet MS/TP 令牌环网的设备个数比较固定，设备网络规划已经稳定，将 Nmax-master 参数设定为 BACnet 令牌环网的最大设备 Station ID 值，也就是该令牌环网的设备个数。

6.1.5　MS/TP 网络物理层中的 RS-485 总线

1. MS/TP 网络物理层的 RS-485 标准

RS-485 标准是 1983 年制定的串行数据传输标准，最初用于计算机主机与外围设备之间的数据传输。随着串行数据传输标准的发展，RS-485 总线技术在各种控制系统中得到了大量的应用。在楼宇自控领域中，也存在大量 RS-485 标准的应用。RS-485 总线具有多点、双向通信能力，即允许多个发送器连接到同一条总线上，同时增加了发送器的驱动能力和冲突保护特性，扩展了总线共模范围，RS-485 总线的通信标准命名为 TIA/EIA-485-A 标准。由于 EIA 提出的建议标准都是以“RS”作为前缀，所以在通信工业领域，仍然习惯将上述标准以 RS 作前缀称呼。RS-485 标准应用于楼宇自控网络或其他控制网络中，需要解决传输介质的访问控制问题，并提供网络层界面服务规范定义的服务。在楼宇自控网络或其他自控网络中，若将 RS-485 标准作为网络的物理层，就必须在物理层与网络层间定义一个“数据链路层”。在 BACnet 标准中就是将 RS-485 标准作为自己的物理层，在 BACnet 网络层与物理层之间定义了一个相当于数据链路层的局域网协议——MS/TP 标准。

MS/TP 网络是一个混合网络。网络中，存在主站点（Master）和从站点（Slave）两种非对

等的站点，使用“令牌（Token）”媒质访问机制进行传输介质的访问控制。当 MS/TP 网络完全由主站点组成时，则 MS/TP 网络变成完全对等的令牌访问网络。当 MS/TP 网络只有一个主站点时，则 MS/TP 网络变为真正意义上的主—从网络。MS/TP 网络既可以在混合模式下运行，也可以在对等模式和主—从模式下运行，是一种工作方式非常灵活的网络。

MS/TP 网络在硬件组成上包括 RS-485 收发器、计时器和通用异步收发器 3 个构件。由于 MS/TP 采用不归零（NRZ）编码，传输电缆线的连接是有极性的。RS-485 收发器的非反向输入端指定为“正极”，而反向输入则为“负极”。在双绞线中，黑色或红色的绝缘线常指定为“正极”，白色、浅色或绿色的绝缘线常指定为“负极”。

MS/TP 网络不采用 T 形连接，RS-485 网段的两端分别连接 120Ω 终端负载电阻，但不允许在网段中间节点之间连接其他端接电阻，每个网段还应设置 510Ω 的网络偏压电阻，以保证处于未驱动状态下的通信线路可靠地位于逻辑“1”状态。这样，网络偏压电阻为站点检测线路上是否有信号提供了可靠的方法。若没有设置网络偏压电阻，当没有站点处于驱动状态时，通信线路就有可能处于不确定的逻辑状态。尤其在有较大噪声或者串音的情况下，某些站点可能将噪声或串音信号误认为是有效信号接收下来，从而产生错误操作。MS/TP 网络网络层 RS-485 总线的连接如图 6-6 所示。

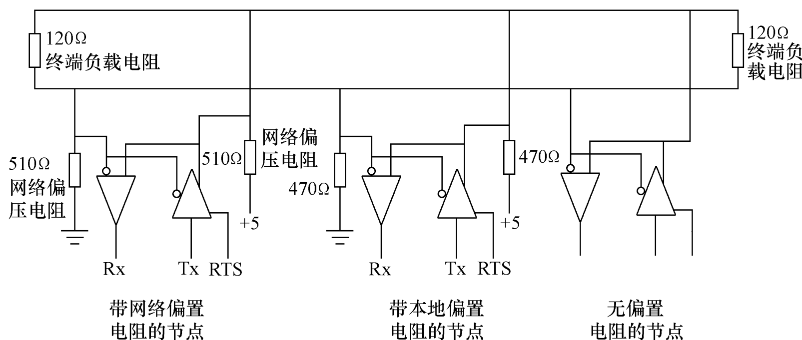


图 6-6 MS/TP 网络网络层 RS-485 总线的连接

RS-485 标准采用平衡（或差分）式数据传输模式，具有较强的抗干扰能力，传输介质采用较为廉价的屏蔽双绞线，并且在传输介质上可以挂接多个接收器。因而 RS-485 标准广泛用于控制系统中现场级数据设备间的数据传输。许多通信标准采用 RS-485 标准作为物理层。

RS-485 标准采用屏蔽双绞线作为传输介质，但没有规定传输速率和传输距离。实际应用时可以根据误码率的大小决定两者之间的关系。BACnet 标准要求传输介质的特征阻抗为 100 ~ 130Ω，分布电容小于 100pF/m（30pF/ft[㊀]），导体和屏蔽之间的分布电容小于 200pF/m（60pF/ft）。双绞线的屏蔽方式可以为箔屏蔽或者编织屏蔽。若采用 AWGl8（导体横截面积为 0.82cm^2）电缆，推荐最大 MS/TP 网段长度为 1200m。

由于 MS/TP 网络物理层直接使用了 RS-485 总线，MS/TP 网络中使用的 2 芯 RS-485 屏蔽双绞线如图 6-7 所示。

RS-485 接口具有良好的抗噪声干扰能力、较长的传输距离和多站能力。RS-485 总线正常情况下使用 3 根线缆，2 根是数据线，1 根是地线，RS-485 接口均采用屏蔽双绞线传输数据。但在许多应用场合使用两根线缆，即没有使用信号地线。

㊀ 1ft = 0.3048m。

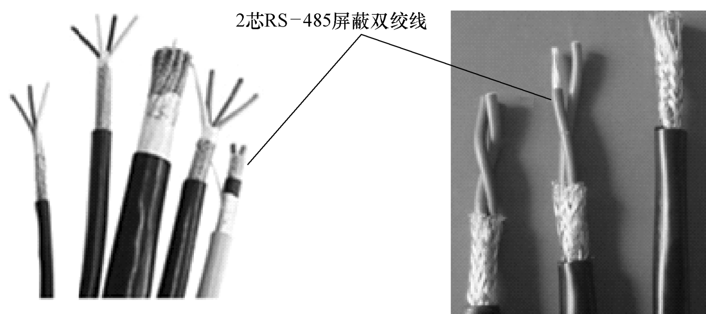


图6-7　MS/TP 网络中使用的 2 芯 RS-485 屏蔽双绞线

2. 不使用信号地线造成的问题

在 RS-485 通信网络中一般采用主从通信方式，就是一个主机和多个从机结构。很多情况连接 RS-485 通信链路时，仅仅简单地将一对双绞线各个接口的“A”、“B”端连接起来，而忽略了信号地的连接，这样连接在许许多应用场合是能够正常工作的，但却会导致一些严重问题。

第一个问题是共模干扰问题。RS-485 接口采用差分方式传输信号，并不需要相对于某个参照点来检测信号，系统仅关注两线间的电位差。但 RS-485 收发器有 -7～12V 的共模电压范围，只有满足这个条件，整个 RS-485 网络才能正常工作。当共模电压超出这个范围就会影响整个网络的通信可靠性，甚至会损坏接口。

第二个问题是 EMI 问题。发送驱动器输出信号中的共模部分需要一个返回通路，如果有一个信号地，就存在这样一个低阻通路，否则就没有这样一个低阻通路，因此要以辐射的形式返回源端，整个总线就相当于一个能够向外辐射电磁波的天线。

3. RS-485 总线的引出线长度和总线特性阻抗

RS-485 网络只能采用终端匹配的总线型结构，不支持环形或星形结构。组建 RS-485 网络时应该注意以下 2 点：

1）采用一条双绞线电缆作总线，将各个节点串联起来，为使引出线的反射信号对总线信号影响最小，从总线到每个节点的引出线要尽量短。许多场所下的网络连接尽管不正确，但在短距离和低速率的使用情况下系统仍能正常工作，但随着通信距离的延长和通信速率的提高，其不良影响越来越严重，引发问题的主要原因是信号在各支路末端反射后与原信号叠加，造成信号质量下降。

2）由于总线特性阻抗的连续性导致在非连续点会发生信号反射。

以下 3 种情况能够产生不连续性：

1）总线的不同区段采用了不同的电缆。

2）或某一段总线上有分布密度较高的收发器。

3）过长的分支线引出到总线。

4. RS-485 总线结构中的终端负载电阻

在 RS-485 组网过程中，还有一个重要问题是终端负载电阻的使用。在设备少、距离短的情况下，总线网络不使用终端负载电阻是能够正常工作的，但随着距离的增加，整个网络的通信性能降低。RS-485 网络应在总线电缆的开始端和末端都并联终端电阻，其阻值取 120Ω，相当于电缆特性阻抗的电阻，因为大多数双绞线特性阻抗大约在 100～120Ω。这种匹配方法也存在一个缺点：匹配电阻要消耗较大功率。还有一种功耗减小的匹配方法，就是利用一只电容 C 隔断直流成分来减小功耗。但电容 C 的容值选择较为困难，要在功耗和匹配质量之间进行平衡。采用二极管匹配也是一种匹配方法，使用二极管的钳位作用削弱反射信号，用以改善信号质量。

5. RS-485 电缆的长度

在组织 RS-485 网络时，对于特定的传输线径，从发生器到负载其数据信号传输所允许的最大电缆长度是数据传输速率的函数，即最大长度受信号失真和噪声等因素制约。

在低速、短距离和无干扰的场合可以采用普通的双绞线，但在高速、长距离传输时，就必须采用阻抗匹配的 RS-485 专用电缆（匹配阻抗为 120Ω）。在干扰严重的环境中应该采用铠装型屏蔽双绞电缆。在使用 RS-485 接口时，对于特定的传输线路，从 RS-485 接口到负载允许的最大电缆长度与信号传输的波特率成反比。理论上通信速率在 100kbit/s 及以下时，RS-485 的最长传输距离达到 1200m，但在实际应用中，这个最大距离会因芯片及电缆的传输特性不同而不同。

6.1.6　一个在 MCU 中实现的 BACnet-MS/TP 协议软件框架

可以使用多种方式来实现 BACnet-MS/TP 协议的软件编程，下面是一个在 MCU（Micro Control Unit，微控制单元）中实现 BACnet-MS/TP 协议的软件结构框架。

完整的协议栈软件自上而下的结构是：应用层模块→对象模块→服务模块→基本数据类型模块→数据链路层（MS/TP）模块→网络层接口模块。

DDC 中的协议栈软件结构中最复杂的是应用层模块，包含 BACnet 对象模块、基本数据类型模块、APDU 解析/分发模块和 APDU 组装模块。

1. 应用层模块

如前所述，BACnet 协议为了节约软硬件开销简化了层次结构，使得 BACnet 应用层涵盖了开放系统互联参考模型（OSI）中会话层、表示层和应用层的功能。BACnet 应用层模块是 BACnet 应用软件的基础，它实现 BACnet 协议应用层内容，负责提供工作站的各功能模块与物理设备直接的通信服务。根据应用层的功能分析，可以将应用层划分为如下模块：对象模块、服务模块、基本数据类型模块。

（1）对象模块

对象模块定义了 BACnet 对象。BACnet 对象按其功能可分为两类：一类是采集数据的对象，如模拟输入/输出对象，这类对象需要访问设备硬件；另一类对象是在采集的数据基础上完成复杂功能，如环对象以及其他实现报警事件功能的对象，这类对象不需访问硬件。另外，某些对象的属性（如趋势登录对象的缓存器大小属性）需要设备厂商根据 DDC 型号进行初始配置，协议栈提供对这些属性的配置函数接口。

（2）服务模块

服务模块用于处理报文的分发、解析和组装。对于从网络层上来的 APDU，服务模块根据 APDU 的类型和服务选择参数，调用相应的服务解析模块。服务解析模块对 APDU 的信息进行解码，并根据需要与 DDC 中的 BACnet 对象进行交互。另一方面，DDC 会发出响应报文（如读属性响应），或者主动发出某些报文（如事件与报警服务），因此服务模块还提供服务报文组装的函数接口。

（3）基本数据类型模块

基本数据类型模块是一个工具类库，包含对基本数据类型的定义及其编、解码函数。BACnet 包含 13 种应用数据类型以及其他基本数据类型。BACnet 应用数据类型可以直接进行编、解码。BACnet 基本数据类型对应着 ASN.1 中的复合数据类型，它是由 BACnet 应用数据类型配合标记按照一定的结构组合而成的。因此，基本数据类型的编/解码实际上是按一定的规则调用应用数据类型以及标记的编/解码方法来实现的。

2. 网络层模块

对于 DDC 来说，网络层向应用层提供一个不确认的无连接数据单元传输服务。网络层与应

用层交互的服务原语是网络层数据单元请求（N-UNITDATA. request）和网络层数据单元指示（N-UNITDATA. indication）。其原语参数如下：

N-UNITDATA. request（destination_address，data，network_priority，data_expecting_reply）

N-UNITDATA. indication（source_address，destination_address，data，network_priority，data_expecting_reply）

DDC 收到来自链路层数据，解析出相应的地址信息，并把地址信息和 APDU 绑定起来存放到一个结构中传送给应用层，这样当应用层需要回复报文时可以得到目标地址。

3. 数据链路层（MS/TP）模块

MS/TP 是一个主从/令牌传递的数据链路协议，物理层采用 RS-485 半双工通信标准。MS/TP 层包含两个状态机，分别是主节点状态机和接收帧状态机；接收帧状态机负责帧的接收，如是数据帧则调用网络层接口上传给网络层，主节点状态机负责帧（包括数据帧和控制帧）的发送。两个状态机分时实现，根据两者之间的关系，接收帧状态机可放在主节点状态机中统一调度。BACnet 数据链路层模块中的接收模块实现接收帧状态机；发送模块实现主节点状态机；串口控制模块实现串口驱动与收发控制，串口读写采用中断方式。

4. 网络层接口模块

网络层接口模块定义接口及接口函数调用模块，使用服务原语 DL_UNITDATA. request 和 DL_UNITDATA. indication 来实现。

使用以上 MS/TP 协议软件结构框架，可以解决 BACnet 控制器的通信功能。解决方案具有极大地多样化特点，这仅仅是其中的一个方案而已。

6.2　PTP 网络

PTP 是 BACnet 特有的局域网技术，使用调制解调器（modem）和公共电话网络来实现 BACnet 数据互操作。PTP 适用调制解调器协议（V. 32bis 和 V. 42），使用 EIA-232 信号标准直连电缆。通信速率为 9. 6 ~ 56. 0kbit/s。

为了使两个 BACnet 设备能够使用各种 PTP 通信机制进行通信，BACnet 定义了一种数据链路层协议，称为 BACnetPTP 通信规范。这个协议的功能是：使两个 BACnet 网络层实体建立 PTP 数据链路连接，可靠地交换 BACnet 协议数据单元（PDU）。通过 EIA-232 连接调制解调器、线路驱动器或者其他数据通信设备进行数据通信。

6.2.1　BACnet PTP 通信

BACnet PTP 通信协议具有全双工通信，但通信具有断续性和通信速率慢的特点。发起通信的 BACnet 设备和目标 BACnet 设备之间建立 PTP 物理连接后，两者就可以交换一系列的数据帧了。一旦两个 BACnet 设备建立了一个 BACnet PTP 物理连接，就可以透明地交换协议数据单元（PDU）了。呼叫设备和被叫设备都有权终止通信，在通信的双方都发送了终止请求之后，就会断开两者的连接。PTP 协议是面向连接的协议，这与其他的 BACnet 数据链路层协议不同。PTP 协议使用了全双工机制，通信双方可以同时发送报文。

6.2.2　BACnet PTP 通信的服务规范

BACnet PTP 通信协议是数据链路层的协议，它向下使用物理层的 RS-232 串行通信总线和调制解调器相连，向上为网络层提供了 8 个数据链路层服务原语，这 8 个数据链路层服务原语及功能见表 6-1。

表 6-1　BACnet PTP 通信协议数据链路层服务原语和功能

原　　语	功　　能
DL-UNITDATA. request	由网络层传递给 PTP 实体,请求使用不确认的无连接方式向一个或者多个远程节点的网络层实体发送一个网络层协议数据单元(NPDU)
DL-UNITDATA. indication	由 PTP 实体传递给网络层,通知有一个来自远程实体的 NPDU 的到达
DL-CONNECT. request	由网络层传递给 PTP 实体,请求建立一个逻辑链路连接
DL-CONNECT. indication	由 PTP 实体传递给网络层,指出已经建立一个逻辑链路连接
DL-CONNECT. confirm	由 PTP 实体传递给网络层,证实已经建立一个逻辑链路连接
DL-DISCONNECT. request	由网络层传递给 PTP 实体,请求释放建立的逻辑链路连接
DL-DISCONNECT. indication	由 PTP 实体传递给网络层,指出已经释放了逻辑链路连接
DL-DISCONNECT. confirm	由 PTP 实体传递给网络层,证实已经释放了逻辑链路连接

6.2.3　PTP 的数据链路帧格式

PTP 的数据链路帧格式如图 6-8 所示。数据帧总共包括 6 个域：前导码域、帧类型域、长度域和帧头校验域、数据校验域和有效数据域。其中前导码域、帧类型域、长度域和帧头校验域组成帧的“头段”；数据域和数据校验域组成帧的“数据段”。

在 BACnet 的 PTP 数据帧中，2B 的数据域长度，不包括 CRC 的 1B。还有数据域长度数据为 0 时，无有效数据。

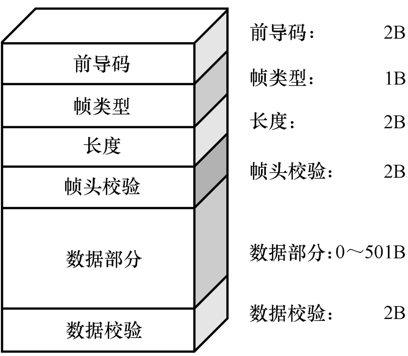


图 6-8　BACnet 的 PTP 通信的数据帧格式

帧类型域中的不同帧类型标识信息如下：

1）X‘00’：不含数据段，通知对等设备数据链路仍有效，但本地设备还不能接收数据帧。

2）X‘01’：不含数据段，通知对等设备数据链路有效并可以接收数据帧。

3）X‘02’：数据帧，包含数据 NPDU，数据域长度为 0 ~ 501B，对应传输序列号 0。

4）X‘03’：数据帧，包含数据 NPDU，数据域长度为 0 ~ 501B，对应传输序列号 1。

5）X‘04’：肯定确认帧，不包含数据段，确认已接收序列号 0 的数据帧，不能接收后续帧。

6）X‘05’：肯定确认帧，不包含数据段，确认已接收序列号 1 的数据帧，不能接收后续帧。

7）X‘06’：肯定确认帧，不包含数据段，确认已接收序列号 0 的数据帧，可以接收后续帧。

8）X‘07’：肯定确认帧，不包含数据段，确认已接收序列号 1 的数据帧，可以接收后续帧。

9）X‘08’：否定确认帧，不包含数据段，确认不能接收序列号 0 的数据帧，不能接收后续帧。

10）X‘09’：否定确认帧，不包含数据段，确认不能接收序列号 1 的数据帧，不能接收后续帧。

11）X‘0A’：否定确认帧，不包含数据段，确认不能接收序列号 0 的数据帧，可以接收后

续帧。

12）X‘0B’：否定确认帧，不包含数据段，确认不能接收序列号 1 的数据帧，可以接收后续帧。

13）X‘0C’：连接请求帧，不包含数据段，由被叫设备发送，请求建立一个 BACnet 连接。

14）X‘0D’：连接响应帧，数据域中为一个密码，由响应连接请求帧的设备发送。

15）X‘0E’：释放连接请求帧，PTP 通信中的两方设备都可发送，其数据域中的数据表示释放连接的原因，长度为 1B，分别是：X‘00’表示已经没有要传输的数据了，X‘01’表示对等进程正在运行，X‘02’表示收到的密码无效，X‘03’表示其他原因。

16）X‘0F’：释放连接响应帧，不包含数据段，确认已经收到释放连接请求帧，并且表示接收释放连接的请求。

17）X‘14’：测试请求帧，启动 PTP 传输路径的环路测试，其数据域长度为 0 ~ 501B。

18）X‘15’：测试响应帧，对测试请求帧的响应，其数据域长度为 0 ~ 501B。

第 7 章　BACnet 标准与 LON 及 ARCnet 网络

7.1　LonWorks 网络

LonTalk 是由美国 Echelon 公司开发的数据通信协议，在工控领域和楼宇自控领域中有着广泛的应用，具体的实施形态就是组建 LonWorks 网络，LonWorks 网络是一种实时测控网络，也是一种局域网，在数十种常用的现场总线技术中，是一种应用广泛的现场总线网络。LonWorks 技术的核心之一是它的通信协议 LonTalk。

LonWorks 技术提供了一个低层通信网络—局部操作网络（LON），使用 LonWorks 技术组成的控制系统除了具有高可靠性和低成本的特点外，其最大的优点是具有很好的开放性，适合应用于建筑物自动化和工业自动化领域。1999 年，美国 ANSI/EIA 将 LonTalk 协议定义为 EIA 709.1-A—1999 国际公开标准。

为了维护 LonWorks 技术在应用层的互操作性，在 1994 年 5 月，由 36 家公司发起，成立了国际 LonMark 互操作协会（LonMark Interoperability Association），目的是指导各生产厂商的产品开发，推广 LonMark 互操作性。2003 年 9 月，国际 LonMark 互操作协会改组为 LonMark 国际协会（LonMark International），这是一个独立的、全球性的非营利性组织，世界上许多著名公司都是其发起者和成员。LonMark 国际协会会员单位不仅包括开发和生产开放系统的制造商，而且还有产品的最终用户、技术规范制订者以及系统集成商等。

BACnet 支持使用 LonTalk 协议的服务来传输 BACnet 报文的功能，BACnet 将 LonTalk 协议规范作为自己的标准。在产品实现中，将 BACnet 的 DL-UNITDATA 原语映射为 LonTalk 应用层接口。

7.1.1　LonWorks 技术的主要组成

BAS 中测控点分散，从一盏灯、一个探头到一部电梯、一台空调机，几乎遍及建筑物各个角落。BAS 还有一个特点是被控设备种类多，包括空调器、新风机、冷冻机、风机盘管、锅炉、换热设备、发电机组、电梯、给排水设备、火灾报警、保安监控、照明配电等设备，并且这些设备往往本身配有控制系统。要实现对建筑物内所有机电设备进行全面监控管理，需要一种低成本、分散的、可以实现互操作的底层测控网络。Lon 网络完全满足以上要求。

LonWorks 技术的一个重要组成部分是它的低层通信协议，它是一个真正开放的协议。它采用了 ISO/OSI 七层框架模式，LonTalk 通信协议的优点包括：小数据包、响应及时、安全、可靠、用对等的方式通信、将控制功能分散化和智能化。

使用 LonWorks 技术架构的控制网络，其网络协议是完全开放的，同时还支持多种不同的通信介质，网络拓扑结构灵活。LonWorks 技术非常适合大楼和住宅小区这样大范围内的信号采集和数据传送。目前国内外有较多的 BAS 采用了 LonWorks 技术。

LonWorks 技术主要由以下 7 个部分组成：

1）智能神经元芯片；

2）LonTalk 协议；

3）LonMark 互操作性标准；

4）LonWorks 收发器；

5）LonWorks 网络服务架构；

6）Neuron C 语言；

7）网络开发工具 LonBuilder 和节点开发工具 NodeBuilder。

LonWorks 网络的基本单元是节点。一个网络节点包括神经元芯片、电源、一个收发器和有监控设备接口的 I/O 电路。

7.1.2　LonTalk 协议

1. LonTalk 协议的七层级模型

LonTalk 协议是对等（peer-to-peer）自控网络通信协议标准，标准编号为 ANSI/EIA 709.1A，其组成内容分为文字说明和基于 Motorala MC68360 处理器的 C 程序参考实现代码两部分。LonTalk 协议是为 LON 控制总线设计的专用协议，它具有以下特点：

1）发送的报文都是数据量较小数据包（通常为几个到几十个字节）；

2）通信速率不高（2kbit/s ~ 2Mbit/s）；

3）LON 网络上的节点往往是低成本、易于维护的单片机；

4）多节点，可灵活地使用多种通信介质；

5）网络通信可靠性高；

6）通信实时性好。

LonTalk 协议也借鉴了 OSI 开放式通信系统互联参考模型的七层级结构，见表 7-1。

LonTalk 协议体系与 ISO/OSI-RM 的七层级结构基本上是对应的，但在结构上还是有些不同：ISO/OSI-RM 的传输层（第 4 层）对应的协议层细分为 3 个协议子层：传输子层（实现确认、非确认单播或多播功能）、认证子层（认证功能）、事务控制子层（报文交换顺序控制和重复检测）。LonTalk 协议将 ISO/OSI-RM 的第 6、7 层进行了合并，主要功能是：网络变量（NV）的变换；面向应用的 RPC；进行网络管理 RPC 以及进行网络诊断等。LonTalk 协议具有数据通信的功能，同时还具有自控网络所特有的互操作功能，并且将互操作功能主要定义在表示层和应用层中。

表 7-1　LonTalk 协议的七层级结构模型

	OSI 层次		标准服务	LON 提供的服务	处理器
7	应用层		网络应用	标准网络变量类型	应用处理器
6	表示层		数据表示	网络变量,外部帧传送	网络处理器
5	会话层		远程遥控动作	请求/响应,认证,网络管理	网络处理器
4	传送层		端对端的可靠传输	应答,非应答,点对点,广播,认证等	网络处理器
3	网络层		传输分组	地址,路由	网络处理器
2	链路层	链路层	帧结构	帧结构,数据解码,CRC 错误检查	MAC 处理器
		MAC 子层	介质访问	P-预测 CSMA,碰撞规避,优先级,碰撞检测	
1	物理层		电路连接	介质,电气接口	MAC 处理器,XCVR

为了进行对比，ISO/OSI 参考模型的七层级的服务功能见表 7-2。

2. LON 网络的地址

（1）物理地址

每个 LonWorks 设备包括一个叫做 Neuron ID（神经元 ID）的惟一 48 位标识符。神经元 ID 通

常在设备制造时分配，在设备整个工作生命周期不会改变。

表 7-2 ISO/OSI 参考模型

	层	目的	服 务
7	应用层	应用程序	标准对象和类型;配置属性;文件传输;网络服务
6	显示层	数据解释	网络变量;应用报文;外部帧
5	会话层	远程行动	对话、远程程序调用、连接恢复
4	传输层	端到端可靠性	端到端确认;业务类型;数据包排序;双重检测
3	网络层	目的地寻址	单播和多播寻址;数据包路由选择
2	数据链路层	介质访问和组帧	组帧;数据编码;CRC 错误检测;介质访问;冲突检测;优先级
1	物理层	电互联	特定的介质接口和调制方式(双绞线、电力线、无线、同轴电缆、红外和光纤)

（2）设备地址

LonWorks 设备安装到某个网络中时，就会分配到一个地址。设备地址用来代替物理地址，因为它们支持效率更高的报文路由选择；简化失效设备的更换。为网络维持设备地址数据库的网络安装工具负责分配设备地址。设备地址由三部分组成：domain ID（域 ID）、subnet ID（子网 ID）和 node ID（节点 ID）。域 ID 标识可以互操作一组设备。要交换数据包，各设备必须在同一个域中。一个域中的设备可多达 32385 个。子网 ID 标识在单一信道上或由中继器连接的一系列信道上的多达 127 个设备。子网 ID 用于在大型网络中数据包的高效路由选择。一个域中的子网可能多达 255 个，节点 ID 标识子网内的个别设备。

对于组地址，一个“group（组）”是一个域内设备的逻辑集合。与子网不同，设备可以集合成组而不问其在域中的物理位置。当使用不确认的报文发送时，一个组成可以有任意数量的设备，假如使用确认的报文发送，一个组内的设备限定为最多 64 个。对于发送到多个设备的数据包，组是优化网络带宽的有效方法。一个域中可以有 256 个以下的组。

（3）广播地址

广播地址标识子网中的所有设备，或域内的所有设备。广播地址是跟许多设备通信的有效方法，有时也用于代替组地址以保存有限数量的可用的组地址。

每个在网上传输的 LonWorks 数据包含有发送设备（源地址）的地址和接收设备（目的地址）的地址。那些地址可能是物理地址、设备地址、组地址或广播地址。

假如设备数量超过域的限值或想要分离设备使其不能互操作，可以使用多个域。有可能使两个或更多的独立 LonWorks 系统共存在同一个物理信道上，只要每个系统有惟一的域 ID。每个系统中的设备只响应与它们的域 ID 相符的数据包，不知道也不关心其他域 ID 发送的数据包。设备响应以它们自己的物理地址发送数据包，该地址通常只有相应的网络安装工具知道。物理网络共享时，由于数据包数量增加，整个网络响应时间将受到影响，所以需要进行协调的整体网络设计。

3. 物理层

LonTalk 协议物理层的主要功能是实现 LON 网络节点间物理信道的电信号互联，保证网络节点间数据信号的正确传输，还负责通过物理信道传输的电信号携载数据的编码及其时序关系处理。支持不同的数据解码和编码，如通常双绞线使用差分曼彻斯特编码、电力线使用扩频、无线通信使用频移键控（FSK）。

LonTalk 协议物理层定义了多种不同的通信介质，如双绞线（Twisted Pair，TP）、电力线（Power Line，PL）、无线射频（Radio Frequency，RF）、红外线（Infrared Ray，IR）、同轴电缆

（Coaxial Cable，CX）、光纤（Optical Fiber，OF）甚至是用户自定义的通信介质。

4. 数据链路层（第 2 层）

LonTalk 协议数据链路层的主要功能：实现通信传输媒质的访问控制（MAC）、LonTalk 协议帧结构处理以及帧错误检测等。传输媒质的访问控制功能由数据链路层中的 MAC 子层协议实现；帧结构处理和 CRC 错误校验则由数据链路层中的其他协议实现。

LonTalk 协议数据链路层中数据的组织结构是 LonTalk 协议帧，LonTalk 协议帧结构如图 7-1 所示。

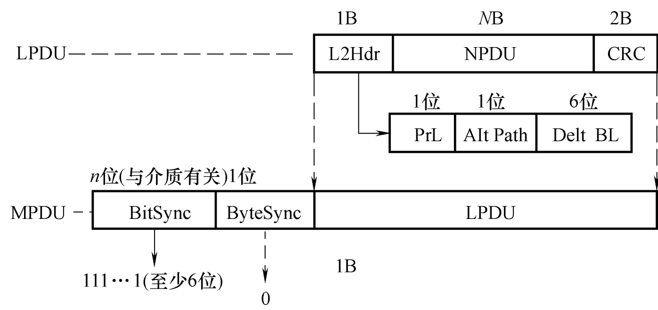


图 7-1　LonTalk 协议帧结构

（1）MAC 子层

LonTalk 协议的 MAC 子层是链路层的一部分，该子层使用标准的通信接口和链路层的其他部分通信。MAC 子层下接物理层，上达链路层，通信结构如图 7-2 所示。

LonWorks 网络技术以超大规模的神经元芯片为核心，神经元芯片使每个节点的应用变得很简单，固化的 LonTalk 协议具有检测应答、自动重发、请求/响应等消息服务功能，保证了通信的高可靠；高可靠的节点结构分散，使得故障隔离，不影响整个系统的正常运行，易于实现冗余备份，从而大大提高了系统的可靠性。

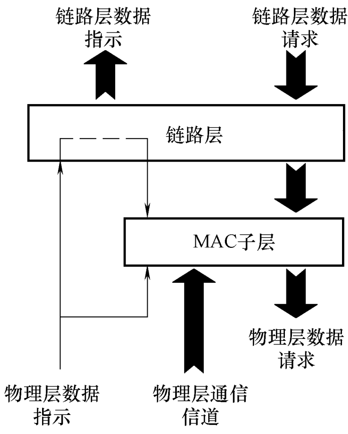


图 7-2　MAC 子层下接物理层上达链路层的通信结构

LonTalk 协议的 MAC（介质访问控制）协议是信息域以太网的媒质访问控制方法的改进，目前存在的 MAC 协议，如 IEEE 802.2、IEEE 802.3、IEEE 802.4、IEEE 802.5 都不能很好地满足在大网络和多通信介质、重负荷下保持网络高效率。如以太网，在轻负载的情况下具有很好的性能，但当在重负载的情况下，重复的碰撞仍会发生，使网络效率大大降低。LonTalk 协议使用改进的 CSMA 介质访问控制协议，称为带预测的 P-坚持 CSMA（Predictive P-presistent CSMA）。它在保留 CSMA 协议优点的同时，注意克服它在控制网络中的不足，可以有效地避免网络的频繁碰撞，能够保证网络的实时性。在带预测的 P-坚持 CSMA 方法中，每一个节点在发送数据前随机地插入 0 ~ W 个很小的随机时间片，LON 网络中的任何节点在发送报文前都会平均地插入 $W/2$ 个随机时间片，W 的值是可以随着网络积压参数（Backlog）的变化而进行动态调整，设定 BL 是网络积压的估计值，$W_{base} = 16$，W 的计算式是 $W = BL \times W_{base}$。

带预测的 P-坚持 CSMA 的媒质访问控制方法同时也是一种算法，如图 7-3 所示，其中的参数说明如下：

1） Beta1：空闲时间；

2） Beta1 > 1bit + 物理延时 + MAC 响应时间；

3） Beta2：随机时间片；

4） Beta2 > 2 × 物理延时 + MAC 响应时间。

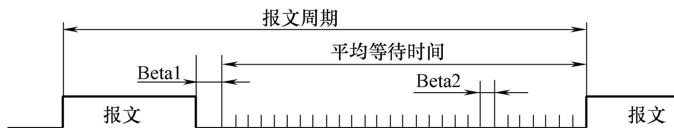


图 7-3　带预测的 P-坚持 CSMA 的媒质访问控制方法

带预测的 P-坚持 CSMA 是 MAC 层的一种保证通信实时性、可靠性的算法，这种算法的内容如下。

LON 网络中的任何一个节点如果要向其他节点发送报文而试图占用通信信道时，首先在报文周期的空闲时间段 Beta1 内检测通信信道是否有信息发送，即要首先确定信道是处于空闲状态还是忙碌状态。随后节点产生一个随机等待 T，该时间片是 0 ~ W 时间片 Beta2 中的一个，当这个随机等待结束时，信道还处于空闲状态，节点向信道送出报文；如果通过检测通信信道处于忙碌状态，经过一个短暂等待后重复 MAC 算法。这里的 Beta2 是报文周期中的平均等待时间段。

网络积压的估计值 BL 实际是对网络当前繁忙程度的一个度量值，LON 网络中的每个节点都用 BL 值来对网络繁忙做出估值，在节点侦测到一个或发出一个 MAC 层协议数据单元（MAC Protocol Data Unit，MPDU）的时候，BL 值加 1，但反过来每隔一个完整的固定报文周期后 BL 值减 1。BL 值位于 MPDU 和链路层协议数据单元（Link Protocol Data Unit，LPDU）数据帧头部。BL 如果减持到 1 的时候，不再减小，而始终保持≥1。于是做到了在网络轻负载时 BL 值小，插入的随机时间片数量少，节点发送报文的速度快；在网络负载重时的 BL 值大，插入的随机时间片数量多，节点发送报文的速度慢，但又能避免发送碰撞。

为对紧急事件做出快速反应，MAC 层提供了一个可选择的优先级机制，允许对需要进行优先处理和传输数据的节点分配一个特定的优先级时间片，在节点需要发送具有优先级的报文时，在这个优先级时间片内实现发送，优先级采用 0 ~ 127 分级，具有不同优先级值的节点等待的时间不同，如某一节点的优先级是 3，表示该节点只需等待 3 个优先级时间片就可以发送报文，另一个节点的优先级是 7，则该节点发送报文需等待的时间为 7 个优先级时间片。高优先级的节点等待的时间片数量少，低优先级的节点等待的时间片数量多；具有优先级的节点与不具有优先级的节点在争用信道时，首先由具有优先级的节点使用信道发送报文。这种信道争用的机制中，还有一种 P-概率时间片，不具有优先级的节点发送报文是在网络中所有具有优先级的节点发送报文完毕后，再等待 P-概率时间片后发送报文。每个具有优先级的节点在等待若干个优先级时间片后，也同样得等待 P-概率时间片后发送报文。带预测的 P-坚持 CSMA 媒质访问控制方法示意如图 7-4 所示。

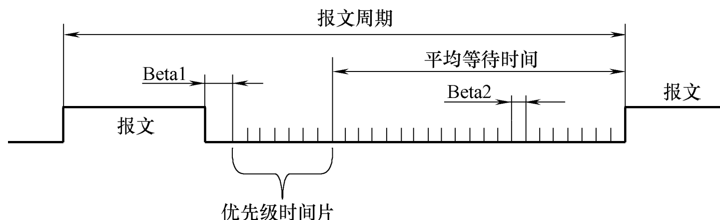


图 7-4　带预测的 P-坚持 CSMA 媒质访问控制方法示意图

带预测的 P-坚持 CSMA 媒质访问控制方法，它甚至在网络过载期间也有极好的性能特点，使信道能以最少的冲突运行其全部容量。LON 网络节点在最少为 16 级的称为 Beta 2 时隙的迟延上随机化。这样，在空闲网络上的平均迟延就是 8 个 Beta 2 时隙。Beta 2 时隙数是由每个节点动态调节的，这种调节是根据每个节点保持的期望网络负载的估计值为基础的。可用的 Beta 2 时隙为 16 ~ 1008 个，随估计值而异。这种估计积压工作和动态调节介质访问的方法使 LonWorks 协议能在轻负荷期间使用少数 Beta 2 时隙使介质访问迟延最小化，而在重负荷期间能使用较多 Beta 2 时隙使冲突最小化。

（2）LonTalk 协议的链路层

LonTalk 协议的链路层负责链路层协议数据单元（LPDU）的无响应传输，该层具有检错的功能，但不纠错，如果数据帧经 CRC 检出错误则抛弃该帧。

在直接互联模式下，物理层和链路层接口采用曼彻斯特编码方案，在专用模式下，不同的电气接口则采用不同的编码方案。

简捷地说，数据链路层定义介质访问和数据编码方法以确保有效使用单一的通信信道。物理层的原始比特流或码元序列分解为数据帧。物理层定义何时源设备可以发送一个数据帧，目的设备怎样接收该数据帧并检测传输误差。还定义了确保重要报文发送的优先级机制。

5. 网络层

LonTalk 协议的网络层定义报文数据包怎样选择从源设备到一个或多个目的设备的路由。网络层定义设备的命名和寻址以确保数据包的正确发送。还定义了设备在不同的通信信道时，怎样在源设备和目的设备间选择路由。

（1）LON 网络的拓扑

为了满足不同的应用环境，LonTalk 协议支持多种不同的物理信道和在同一种信道上支持多种网络拓扑，如星形结构、总线型结构、环形结构等，如图 7-5 所示。

1） 星形结构：

① 无转发器或路由器，可带 64 个控制器；

② 最大布线长度为 500m；

③ 控制器间最大距离为 400m；

④ 只需一个终端模块。

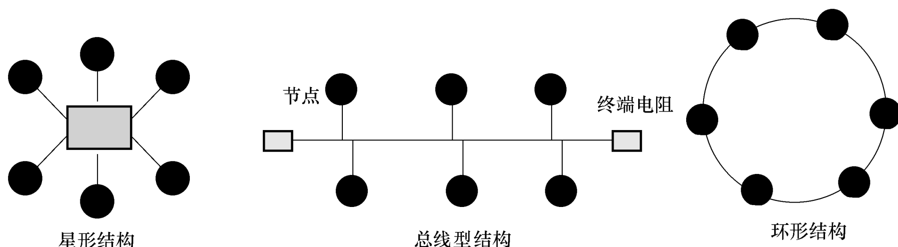


图 7-5　星形结构、总线型结构、环形结构

2）总线型结构：

① 无转发器或路由器时可带 64 个控制器；

② 最大布线长度为 2700m；

③ 两端各需一个终端模块；

3） 环形结构：

① 无转发器或路由器时可带 64 个控制器；

② 最大布线长度为 500m；

③ 控制器之间最大距离为 400m；

④ 只需一个终端模块。

（2）LON 网络中的中继器、网桥和路由器

使用不同的物理传输媒质构建 LON 网络时，可以用中继器、网桥和路由器进行物理信道或子网的连接。

中继器将一个信道的电信号或光信号转发到另一个信道，没有存储环节；存储/转发中继器的作用是将一个信道发送来的数据包进行存储转发到另一个信道；网桥的作用与存储/转发中继器基本相同，但转发的数据包与存储的数据包必须在同一个域（domain）内。将两个不同的子网实现互联的设备是路由器，其功能是依据路由算法将信源节点所在子网的数据包转发给目标节点所在的子网。

中继器、存储/转发中继器和网桥将不同的信道连接起来，实现信号、数据包在不同的信道之间的传输，由这些设备可以形成 LON 网络的子网，使用路由器将不同的子网互联，形成 LON 网络。这种由中继器、存储/转发中继器、网桥、路由器和网络节点组成的 LON 网络结构如图 7-6所示。

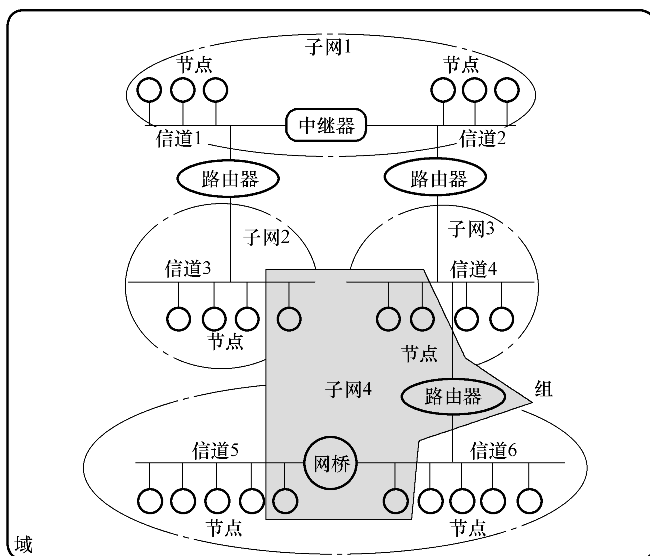


图 7-6　LON 网络结构

图 7-6 中的域是指通过路由器将若干子网互联起来的网络，域中的不同节点可以组成为组，组中的节点可以是同一个子网内的，也可以是不同子网内的。图 7-6 中的阴影部分表示一个组。

（3）域地址、子网络地址和节点地址

1）域地址（域 ID）：域是一条或多条信道中节点的逻辑集合，换言之是 LON 网络中网络节点的逻辑结合，是地址分级结构中的最高级。LonTalk 协议只限于同一域内的节点，不支持不同域间通信。当信道上存在多个子网时，使用域地址可以避免不同网节点间的干扰。如不同的 LonWorks 网络使用一条共享的无线射频媒体，不同的域标识可以使网络之间互不干扰。LonWorks 节点最多可以属于两个域。域 ID 可以配成 0B、1B、3B、6B。网络中最多可以包括 2^{48} 个域。

一个域有一个域 ID 标识，域 ID 可以配置成 0B、1B、3B 或 6B，6B 的域 ID 可以确保域 ID 是惟一的。

2）子网络地址：在 LON 网络中，子网络地址用 1B 进行编址，即地址范围是 2^8，取出除去全 0 和全 1 的组态，一个域最多有 255 个子网络。

3）节点地址：在 LON 网络中，节点地址 7 位编码进行组态编码，最高位用于特殊用途，一个子网络最多有 127 个节点。每个节点具有一个惟一的编号，该惟一编号即节点地址。

（4）组地址、成员地址与 Unique-Node-ID

一个域中若干节点的逻辑集合就是组。组是进行广播通信时要采用的地址形式。节点的分组可以包括不同的信道、网桥和路由器等。一个节点可以分属于不同的组，但最多不能超过 15 个组。组地址也是采用 8 位进行组态编码，所以一个域最多可以有 256 个组。组成员地址用 6 位进行编码，所以一个组最多有 63 个成员（全 0 组态的编码保留）。Unique-Node-ID 是神经元芯片出厂的 48 位编号，它在全球范围内是惟一和不变的，所以可用 Unique-Node-ID 对网络节点进行编址。

LON 网络中的任何一个节点都有惟一的 Unique-Node-ID 外，还可以根据节点在网络中的位置利用网络管理工具同时分配多种不同形式的地址便于管理。

网络节点可以使用 5 种编址方式（见表 7-3），整个地址长度为表中的地址长度 + 域 ID 长度（0 ~ 6B）。

表 7-3　网络节点编址方式

编址方式	说　明	地址长度/B
域(子网 = 0)	所有节点都在域中	3
域,子网	所有节点都在子网中	3
域,子网,节点	一个子网拥有特殊节点	4
域,组	所有节点都在组中	3
域,Neuron　ID	特殊节点	9

LON 网络中的子网、域、域中组等包括的部件数量受到限制：

1）子网中的设备：127；

2）域中的子网：256；

3）域中设备：32385；

4）网络中的域：2^{48}；

5）系统中最多设备数：$32k \times 2^{48}$；

6）组中成员：

① 未确认的或重复的无限制；

② 确认的或要求的响应：63；

7）域中的组：255；

8）网络中的信道：无限制；

9）一个网络变量中的字节：31；

10）一个应用程序或外来帧报文中的字节：228；

11）数据文档中的字节：2^{32}。

（5）LonTalk 协议报文地址格式编码结构

LonTalk 协议的报文只能在同一个域内传输，而且域地址、源地址和目标地址共用。LonTalk 协议定义的报文地址格式编码的结构如图 7-7 所示。

LonTalk 协议报文地址格式编码说明如下：

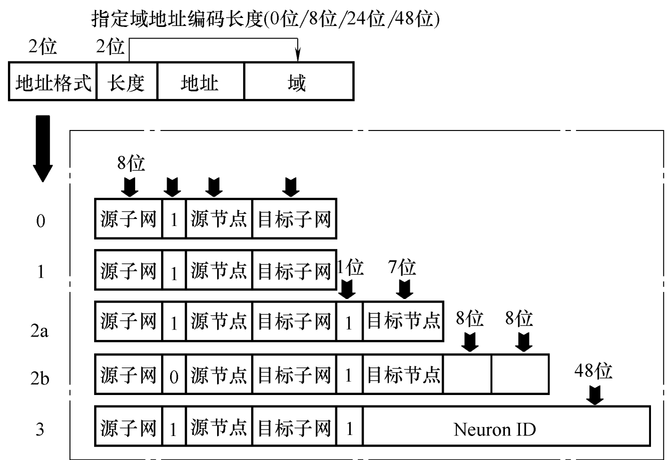


图 7-7　LonTalk 协议定义的报文地址格式编码的结构

1）节点地址中的最高位通常编码为“1”；

2）“0”类型地址用于域范围内广播；

3）“1”类型地址用于组方位内广播；

4）“2a”类型地址用于又确认的单播；

5）“2b”类型地址用于组确认过程；

6）“3”类型地址用于管理工具分配地址；

7）报文的目标子网地址为“0”时，报文向域内所有子网广播发送。

（6）路由功能

在 LON 网络中节点间通信的过程中，工作在网络层的路由器根据路由表将报文从一个子网转发到与之连接的另一个子网，如果是接到一个域范围内的广播报文时，路由器将该报文广播式转发到域内所有的目标子网络。

（7）网络层报文的结构

LonTalk 协议网络层报文（NPDU）的数据组织结构如图 7-8 所示。

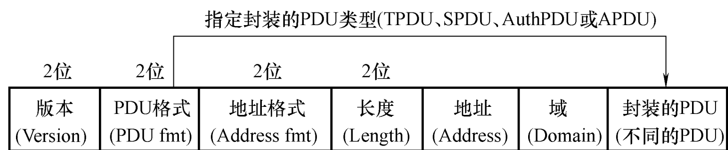


图 7-8　LonTalk 协议网络层报文（NPDU）的数据组织结构

NPDU 结构中的第 2 部分是专门用于指定 NPDU 所封装各种 PDU 报文类型的，网络层报文可以封装传输层报文（TPDU）、传输层认证子层的认证报文（AuthPDU）、会话层报文（SPDU）或应用层报文（APDU）。

（8）某 LonWorks 路由器的工作模式和功能

某型号 LonWorks 路由器如图 7-9 所示。

该路由器可使用多种不同的网络传输介质，支持 FTT-10A、TPT/XF-78 或 TPT/XF-1250 收发器之间的灵活组合，用以连接两个信道并传递 LonTalk 报文；同时，还可以进行 LonWorks 网络流量控制，增加网络吞吐量和容量，并支持大小不等的网络安装，节点可达几十个到数千个。

该路由器可连接的通信介质类型如下：

1）FTT-10A（FT-X1 变压器），双绞线，自由拓扑/总线，78kbit/s；

2）TPT/XF-78，双绞线，总线，78kbit/s；

3）TPT/XF-1250，双绞线，总线，1.25Mbit/s；

4）逻辑分割 LonWorks 网络，并过滤信息；

5）符合 LonMark 标准；

6）DIN 导轨安装。

利用配置软件，用户可根据应用的实际情况，将该路由器配置成 4 种不同的路由模式（Repeater/Bridge/Configured Router/Learning Router），以满足不同的网络安装要求，见表 7-4。



图 7-9　某型号 LonWorks 路由器

表 7-4　路由模式

模式	功　　能	应　　用
中继 Repeater	逻辑中继器是最简单的运行模式。不考虑信号的发送方、域和接收方，所有接受到的有效 LonTalk 报文都将被转发。允许多种通信介质和报文类型	扩展了物理网络的复杂程度、通信距离和节点数量。不同于物理层中继器，网络中可以串联多个逻辑中继器
桥 Bridge	如果发送方的域与路由器所在的某个域一致，则转发有效的 LonTalk 报文。报文的接受方不受影响	连接 1 或 2 个域
配置路由 Configured Router	转发两个域中收到的有效 LonTalk 报文，并为每侧的域各建立一个转发表。表中包含了 255 个子网和 255 个组的标志符。这些标志符用以标识报文目标子网或组地址是否会被转发	准确分割网络交通，特别是可用于网络负荷很重的情况，或采用环形结构的网络
自学习路由 Learning Router	配置路由的一种特殊类型。不同于配置路由器的转发表由网络管理工具组态，自学习路由器的子网转发表将通过学习过程自动更新。复位后，所有子网转发表被配置成转发任何一侧域的有效 LonTalk 报文。每出现一个新的源子网号，检查子网寻址路径，并清除路由器另一侧子网转发表的相应标识位。由于转发表存储在 RAM 中，复位后学习过程将重新开始。组转发表被配置成总是转发属于目标组地址的报文	简化安装过程

6. 传输层

传输层确保报文数据包的可靠发送。报文可以使用确认服务来交换。发送设备等待来自接收设备的确认，假如确认未能收到就重发报文。传输层还定义了重复报文怎样检测，假如一个报文由于确认丢失而重发，则将其拒绝。

LonTalk 协议传输层分为“事务控制”、“认证”和“传输”3 个子层。3 个子层的主要功能分别如下：

1）事务控制子层：控制报文的传输顺序和重复报文的检测；

2）认证子层：提供发起通信的请求和响应的认证功能；

3）传输层：为应用层（而不是相邻的会话层）提供可靠的报文传输，这里注意不是为其上一层（会话层）提供可靠的报文传输。

认证子层的认证功能是 LonTalk 协议的安全功能，并且该功能可选。认证服务过程由发起者和呼应着交互 AuthPDU 报文组成。AuthPDU 报文的结构如图 7-10 所示。发起者指发起认证请求的一方，呼应者是指接受认证请求的一方。认证服务过程是：发起者产生一个 64 位的随机数 RandomBytes，同时将相关的信息一起按规范结构组成 CHALLENGE（O）报文，发给呼应方，随

后呼应方用一个 48 位的私钥（K）将该随机数加密为 64 位的加密数（CryptoBytes），并形成 REPLY（2）报文作为响应报文（Y），呼应者检验响应报文（Y），来确定通过认证与否。

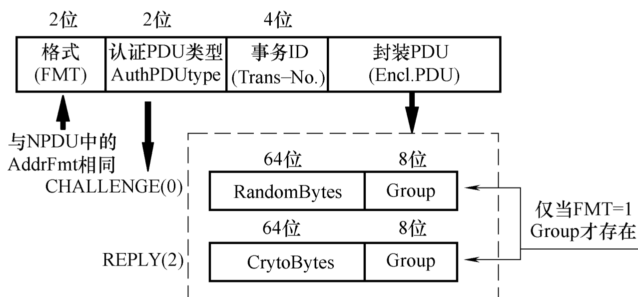


图 7-10　AuthPDU 报文的结构

传输层报文结构（TPDU）如图 7-11 所示。

“TPDU 类型”是指以下 5 种类型的 TPDU：

1）ACKD（0）类型：该类型报文是可靠性服务传输事务中的首发报文。

2）UnACKD_RPY（1）类型：该类型报文不要求目标节点回送确认信息，只要求在规定的重发次数内无修改地重复发送该报文。

3）ACK（2）类型：该类型报文仅有 TPDU 结构头部编码，无封装 PDU，用于对 ACKD（0）报文的确认。

4）REMINDER（4）类型：该类型报文是可靠性服务传输事务的重传报文，该类型报文用于组成员≥16 的可靠性组播传输。

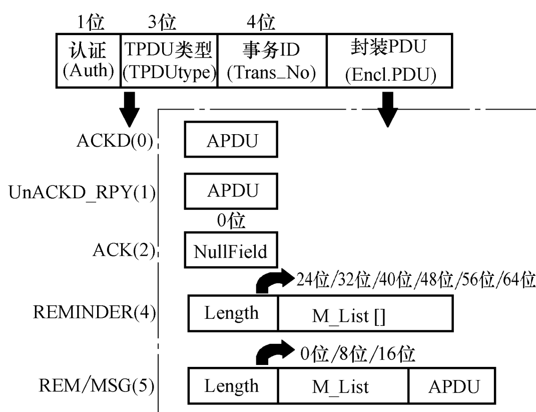


图 7-11　TPDU 结构

5）REM/MSG（5）类型：也是可靠性服务传输事务的重传报文，用于组成员 <16 的可靠性组播传输。

7. 会话层

会话层在较低层交换的数据上增加控制。它支持远程操作，使用户可以向远地服务器提出请求并获得对此请求的响应。它还定义了一个鉴别协议，使报文接收者能确定发送者是否有权发送该报文。LonTalk 协议的网络功能尽管是在应用层实现的，但实际上也是由提供会话层的请求/应答机制来完成的。

会话层只使用了下面传输层中的事务控制子层对传输顺序进行控制和报文重复进行检测。会话层在进行认证服务时，则使用传输层中的认证子层。

8. 表示层/应用层

LonTalk 协议简化了表示层，并和应用层合并为一个层，使表示层成为应用层的一个组成部分，通过定义报文数据的编码，在较低层交换的数据上增加结构。LonTalk 协议的应用层在较低层交换的数据上增加应用程序兼容性。标准对象确保应用软件对在较低层交换的数据使用共同的语义解释，从而促进互可操作性。共同语义解释确保不同的应用软件对网络变量的更新显示共同的行为。

LonTalk 协议应用层定义了应用层协议数据单元（APDU）结构，如图 7-12 所示。

7.1.3　Neuron 神经元芯片

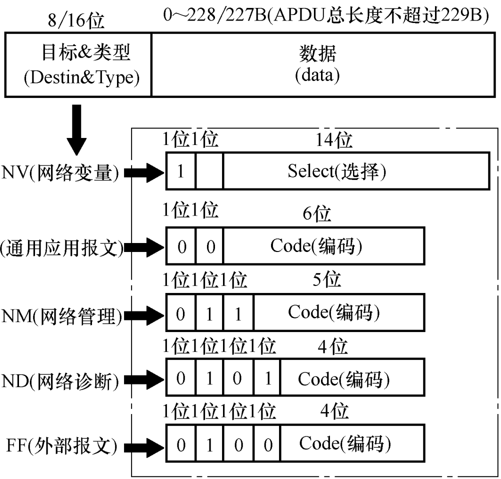


图 7-12　APDU 结构

LonWorks 的技术核心之一是 Neuron 神经元芯片技术，这种使用 CMOS CLSI 技术的神经元芯片使实现低成本的网络控制成为可能。

1. LonWorks 应用系统的关键设备

LonWorks 应用系统中，智能设备或节点可以采集现场仪表检测到的各种控制参数，或者向现场设备发送控制信号，各节点可以通过不同的通信介质与其他节点进行通信。LonWorks 应用系统包括以下 3 种关键设备：

1）Neuron 芯片；

2）LonWorks 收发器；

3）LonBuilder 和 NodeBuilder 开发工具。

LonWorks 技术的核心通信标准是 LonTalk 协议，也具有 OSI 完整的七层模型协议栈结构。

Neuron 芯片是一个超大规模集成电路元件，分为 MC143150 和 MC143120 两个型号系列，是 LonWorks 网络技术的核心器件，它实现 LonWorks 应用系统的功能并执行节点中的特定应用程序。一个典型的节点包含 Neuron 芯片、电源、收发器和 I/O 电路（输入/输出通道）。一个典型节点的组成和 Neuron 芯片在典型节点中的位置和一个 Neuron 芯片外观如图 7-13 所示。Neuron 芯片用于通信或控制，I/O 接口用于连接 I/O 设备，收发器负责将节点连接上网。

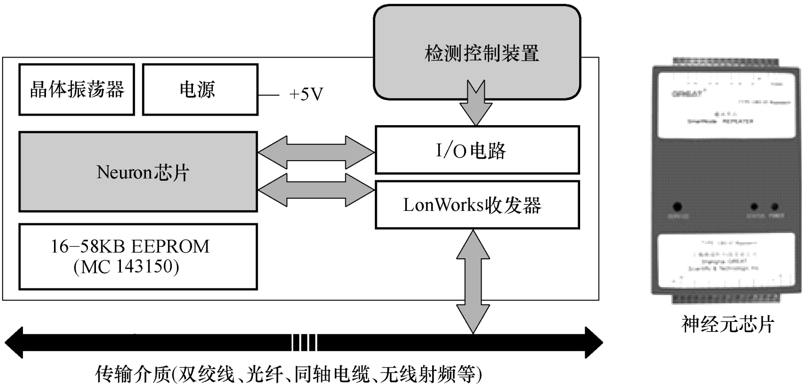


图 7-13　典型节点框图

2. 微处理器单元（CPU）

Neuron C 芯片中包括了 3 个 8 位的 CPU：介质访问 CPU、网络 CPU 和应用 CPU，这 3 个处理器在系统固件中各有独特的功能。

（1）介质访问 CPU

介质访问 CPU（MAC）主要控制七层网络协议中的物理层和数据链路层，它负责驱动通信子系统的硬件，并执行避免冲突的算法。介质访问控制处理器和网络处理器通过共享存储器中的网络缓冲区进行网络信息的收发工作。

（2）网络 CPU

网络 CPU 主要控制网络协议中的 3 ~ 6 层，以及网络层、传输层、会话层、表示层的事务。

处理网络变量进程、寻址、鉴别认证、软件定时器、网络管理和路由等功能。网络 CPU 使用共享存储器中的网络缓冲区同介质访问控制处理器互传信息，使用共享存储器中的应用缓冲区同应用处理器互传信息。在更新共享缓冲区的数据时，用硬件信号来仲裁对共享缓冲区数据访问的冲突。

（3）应用 CPU

应用 CPU 主要负责与用户进程接口的应用层，执行用户代码和为用户代码调用的操作系统服务。

3. 网络通信端口

Neuron 芯片可支持多种通信介质，使用最广泛的是双绞线和电力线，还支持 RF（无线射频）、IR（红外）、光纤和同轴电缆等。Neuron 芯片含有一个通信端口，它提供的 5 个引脚通过不同类型的收发器可与多种通信介质连接。

通信端口可工作在以下 3 种模式之一：单端、差分和专用模式。

（1）单端模式

单端模式是最常用的一种模式，用于实现收发器与多种通信介质的连接，图 7-14 给出了单端工作模式的通信端口配置。数据通信通过引脚 CP0 和 CP1 的单端输入/输出缓冲区完成。CP3 引脚在 Neuron 芯片进入睡眠状态时输出低电平，收发器依此切断有源电路的电源。CP4 是冲突检测输入，当硬件冲突检测电路检测到通道上有冲突时，通过该引脚告知 Neuron 芯片，该引脚低电平有效。

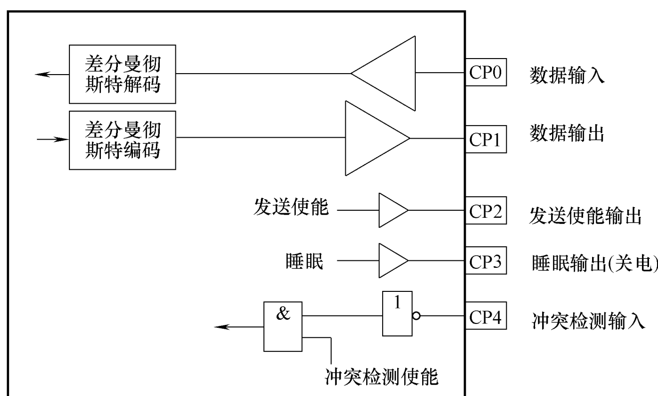


图 7-14　单端模式的通信端口配置

（2）差分模式

图 7-15 所示为差分工作模式的通信端口配置图，其中的滤波器为可选的低通滤波器，用来抑制噪声。差分模式下的数据包格式与图 7-14 所示的单端工作模式相同。

差分模式在大多数场合与单端模式类似，它们的主要区别在于驱动/接收电路被设置为差分线路传送。在发送期间，数据输出引脚 CP2 和 CP3 的状态是反相的，即送出差分信号，这种方式可以抵消线路干扰信号。而在不发送期间，数据输出引脚 CP2 和 CP3 的状态为高阻状态。

（3）专用模式

在某些特定应用场合，需要 Neuron 芯片直接提供没有编码和未加同步头的原始报文。此时需要一个智能发送器接收来自 Neuron 芯片的无编码数据，然后按一定的数据格式组建数据包并插入同步头。智能接收器收到报文后，检测并丢弃同步头，将还原的无编码格式和无同步头的报文传送给 Neuron 芯片。

在专用模式下，Neuron 芯片和收发器之间通信采用专用协议，此协议由 Neuron 芯片和收发

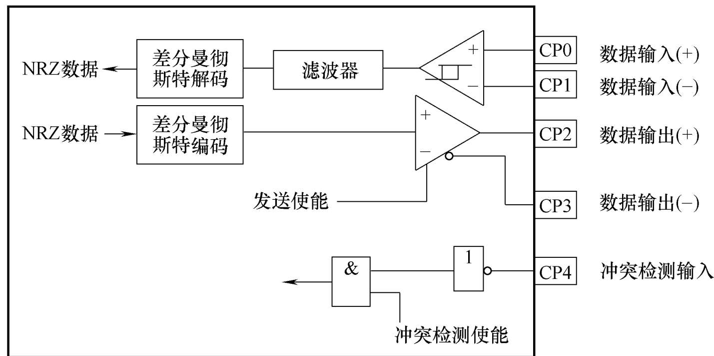


图7-15　差分工作模式的通信端口配置

器两部分组成，它们之间同时传送16位数据（8位状态和8位数据），在Neuron芯片输入时钟频率为10MHz时，连续传输速率最大可达1.25Mbit/s。

7.1.4　收发器

Neuron芯片的通信端口通过收发器接入网络和网络交换信息，各种不同的收发器支持不同的通信介质。LON网络中的网络设备都包含一个收发器，收发器提供LonWorks设备和LonWorks设备以及LonWorks网络之间的物理通信接口。收发器可用于各种通信介质和拓扑结构。具有不同类型收发器的产品仍然能互操作，但这需要使用路由器。

1. 双绞线收发器

双绞线收发器是一种最通用的类型，双绞线收发器与Neuron芯片的接口有3种基本类型：直接驱动、EIA-485和变压器耦合。

直接驱动接口使用Neuron芯片的内部收发器，并配有外接电阻、限流二极管和ESD保护装置；通常市售的EIA-485收发器能支持多种数据传输速率（最高达1.25Mbit/s）以及多种通信介质，Neuron芯片的通信端口必须在单端模式才能与EIA-485网络相连；变压器耦合接口适用于需要高性能、高隔离度和高抗干扰能力的应用场合。

双绞线收发器FTT-10A由一个隔离变压器和一个差分曼彻斯特编码器组成，它由5V电源供电。

双绞线收发器FTT-10A与Neuron3150芯片连接图如图7-16所示。NETA、NETB是两个网络接口，此接口没有极性要求。RXD、TXD分别是数据接收和发送端口，CLK是收发器的时钟输入端，T1、T2用来提供钳位和瞬时电压保护。

FTT-10A收发器支持星形、环形接线。FTT-10A通信速率一般为78kbit/s，但用于自由结构时，通信距离较短（只有500m），而采用双端总线型结构时却有2700m。它可工作在5MHz、10MHz或20MHz频率下，并可自动进行时钟检测。

FTT-10A使用编码方式是差分曼彻斯特编码，其编码规律如下：在每一个码元的中间都有一次跳变，以实现数据流的同步发送和接收。“1”或“0”取值由每个码元开始的边界是否存在跳变而定，如果是“0”，则码元的前半部分电平与前一个码元后半部分的电平相反，如果是“1”，则码元前半部分电平与前一个码元后半部分的电平相同，如图7-17示。

数据、时钟和曼彻斯特编码的关系如图7-18所示。

FTT-10A TXD、RXD分别与神经元芯片通信端口CP1、CP2连接。

Echelon公司的双绞线收发器系列产品还有其他的一些型号，数据传输速率在78kbit/s～1.25Mbit/s的数据范围，支持总线型、环形或星形等结构。

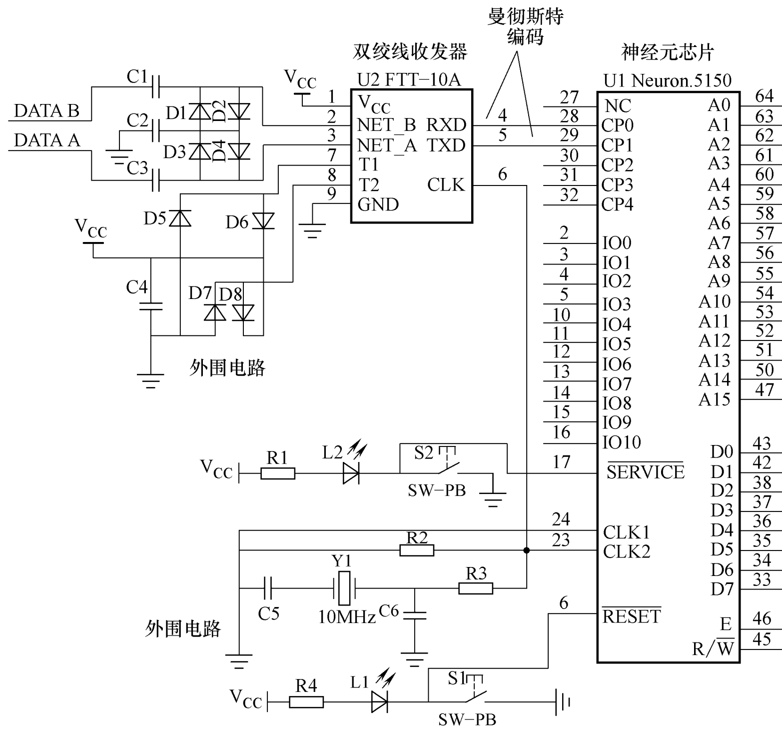


图 7-16　FTT-10A 与 Neuron3150 芯片连接图

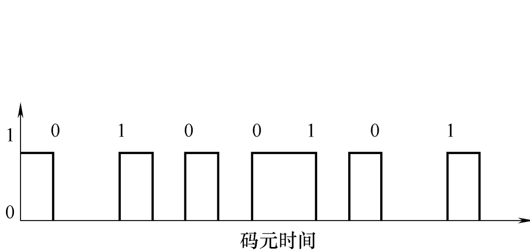


图 7-17　差分式曼彻斯特编码

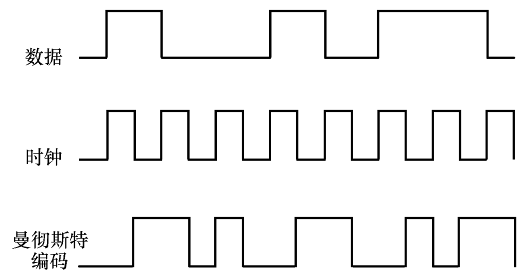


图 7-18　曼彻斯特编码编码过程与波形

2. 电力线收发器和无线射频收发器

Echelon 公司提供有一组符合北美和欧洲标准的电力线收发器系列产品，当 Neuron 芯片与电力线收发器接口时，Neuron 芯片的通信端口应设置为专用模式，此时的最高数据传输速率为 10kbit/s。系列产品中使用不同的数据传输速率：10kbit/s、5kbit/s、2kbit/s。

使用无线射频作传输介质的无线射频收发器还可以灵活地应用于许多不同的场合，并有不同的频率范围可供选择。与无线射频收发器接口时，Neuron 芯片的通信端口应设置为单端工作模式，此时能达到的最大数据传输速率为 4800bit/s。

7.1.5　LonWorks 节点技术

LON 网络中的节点类型可按是否采用神经元芯片分：以神经元芯片为核心的控制节点和采用 MIP 结构的控制节点。

以神经元芯片为核心的控制节点中，一个神经元芯片加上收发器便可构成一个典型的现场控制节点。图 7-19 所示为一个神经元节点的结构框图。

由于神经元芯片是 8 位总线结构，芯片中的 3 个 CPU 都是 8 位的 CPU，所能完成的功能是有限的。对于一些复杂的控制，如带有 PID 算法的单回路、多回路的控制就显得力不从心。采用 HostBase 结构是解决这一矛盾的很好的方法，将神经元芯片作为通信协处理器，用包含更高性能微处理器的主处理器来完成复杂的测控功能。典型的 LON 网络 HostBase 的结构如图 7-20 所示。

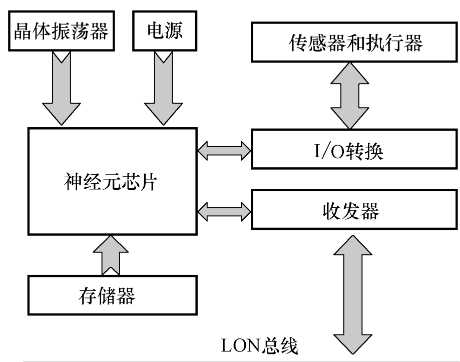


图 7-19　一个神经元节点的结构框图

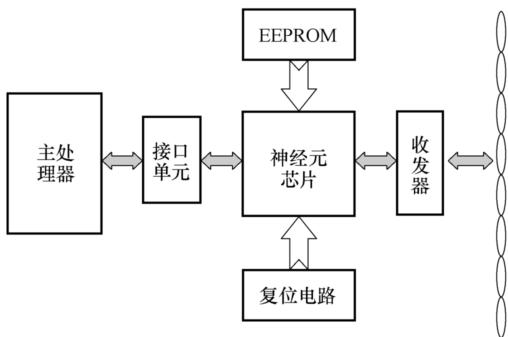


图 7-20　HostBase 的结构

如果按用途分，LonWorks 设备、路由器是常见的 LON 网络节点。

1. LonWorks 设备

每个连接到 LON 网络上的设备通常以合适的机械封装并内含一个神经元芯片和一个收发器。根据设备的不同功能也可以有嵌入式传感器和执行器，对外部传统传感器和执行器的输入/输出接口，对主机的接口，对另一神经元芯片和 LON 网络路由器收发器的接口。由神经元执行的应用程序实现设备的个性化功能，它可以存储在 ROM（只读存储器）中，也可以通过网络下载保存到 PROM 或者 EEPROM 中。

LonWorks 网络中的大多数设备的工作是检测和控制被控物理系统的各个组件的状态。这些设备叫做 LonWorks 控制设备，它们可以拥有嵌入式传感器和执行器的任何组合或对外部传感器的输入/输出接口。设备中的应用程序可以按照给定的控制逻辑具体地实现各种监控功能，如 PID 环路控制、数据记录和时序调度等。

2. 路由器

对多种介质的支持可以使不同的用户能够选择最适合它们需要的介质和通信方法。路由器也能用于控制网络业务量和分割网络段使其不受另一网络段通信量的影响，从而增加总处理能力和网络容量。网络工具以网络拓扑结构为基础自动配置路由器，使路由器的安装便于不同的用户并对设备而言是完全透明的。

路由器允许单一的对等网络跨接多类型的传输介质和数量较大的 LonWorks 设备。路由器对网络的逻辑运算和路由算法是透明的，但是路由器并不能传输任何数据包。采用智能型路由器就可以很好地了解系统配置，阻断没有远端接收者的数据包。LonWorks 系统中大量使用的还有 LonWorks/IP 路由器，能接入 Internet 等广域网进行系统的远程监控。

7.1.6　Neuron C 语言

在 LonWorks 技术中，Neuron 芯片的程序设计语言是 Neuron C。Neuron C 基于标准 C 并在标准 C 的基础上进行了自然扩展。Neuron C 没有使用标准 C 的部分功能，如标准的函数库等，Neuron C 提供了在 LON 网络环境下的一些特定对象集合以及访问这些对象的内部函数。Neuron C 提供了一些适用于 LonWorks 应用系统开发的新功能。

Neuron C 提供的部分新功能如下：

1）网络变量：一个新的对象类，网络节点间的数据通信和数据共享。

2）when 语句：一个新的语句类型，用来引入对事件当前时间序列进行定义，引入事件（e-vents）驱动机制，整个应用程序用 when 语句引导。

3）I/O 操作的显式控制，使 Neuron 芯片的多功能 I/O 接口标准化，便于对多种类型的信号进行监控。

4）支持显式报文，用于直接访问基础的 LonTalk 协议服务。

1. Neuron C 与 ANSI C 语言的区别

美国国家标准局（ANSI）颁布的 ANSI 标准 X3. 159—1989，也就是 ANSI C 标准，由这个标准定义的 C 语言被称作 ANSI C。Neuron C 严格遵守 ANSI C 语言规则，但不是对 ANSI C 的全部复制性实现。Neuron C 与 ANSI C 之间的主要区别如下：

1）Neuron C 不支持浮点运算：浮点运算就是实数运算，浮点运算速度很慢。机器有两种办法表示实数：一种是定点，就是小数点位置是固定的；另一种是浮点，就是小数点位置不固定，计算方法也比较麻烦且计算量大。浮点运算使用 3 种不同的数据：

① 整数（Integer），又分为字、短整数（Short Integer）和长整数（Long Integer）；

② 实数（Real），分单准确度（Single Real）和双准确度（Double Real）；

③ 压缩的二-十进制数。

浮点数比定点数的表述范围宽，有效准确度高，更适合于科学计算与工程计算。浮点运算可分为 2 类：非规格化和规格化浮点运算。非规格化浮点运算，不要求操作数是规格化数，对运算结果也不要求规格化处理。而规格化浮点运算只能对规格化的浮点数进行操作，并且要求对运算结果加以规格化处理。

Neuron C 尽管不支持浮点运算，但它提供了一个浮点库，允许使用符合 IEEE 754 标准（IEEE 二进制浮点数算术标准）的浮点数。

2）ANSI C 定义 short int 为 16 位或多于 16 位，long int 为 32 位或多于 32 位；而 Neuron C 定义 short int 为 8 位，long int 为 16 位。在 Neuron C 中，int 默认为 short int。如果需要使用 32 位的值，可以使用 32 位有符号整数库。

3）Neuron C 不支持 register 或 volatile 类。

4）Neuron C 在自动（auto）变量定义时不对其赋初值。

5）Neuron C 不支持将结构体（structure）和共用体（union）作为过程参数或作为函数的返回值。

6）Neuron C 的网络变量不能为指针类型。

7）Neuron C 不支持指向定时器、消息标签（Message Tag）和 I/O 对象的指针。

8）Neuron C 指向网络变量和 EEPROM 变量的指针被当作指向常量（const）的指针，被这个指针引用的变量内容可读但不能被修改。

9）Neuron C 的宏被扩展后，宏参数才能被重复扫描。宏操作符“#”和“# #”在嵌套的宏表达式中出现时，不能像 ANSI C 定义的那样产生相应的结果。

10）Neuron C 的网络变量名和报文标签被限定在 16 个字符以内。

11）一些标准 C 库函数（如 memcpy（）和 memset（）等）被 Neuron C 所保留。Neuron C 还提供有针对字符串和字节的操作库，从而允许用户使用定义在〈string. h〉头文件中的标准 C 函数的子集。其他的标准 C 库函数（如文件 I/O 和存储分配函数等）并不包括在 Neuron C 中。

12）Neuron C 包括 3 个标准头文件：〈stddef. h〉、〈stdlib. h〉和〈limits. h〉。

13）如果出现函数调用先于函数定义的情况，Neuron C 要求首先声明函数原型。

14）Neuron C 包含了一些补充的保留字和语法，这些保留字和语法并不包括在 ANSI C 中。

15） Neuron C 支持二进制常数，作为对八进制和十六进制的补充。二进制常数以 0B <二进制数>的形式定义，例如，0B1101 等于十进制数 13。

16） Neuron C 支持来自 C + + 的//…注释格式，作为对传统/ * … * /注释格式的补充；在//…格式中，两个斜杠（//）开始一个注释行。

17） Neuron C 不再使用 main（）函数结构，而是代之以由 when（）语句和函数组成的 Neuron C 程序的可执行对象。

18） Neuron C 不支持标准 C 的预处理指令#if、#elif 和#line，但支持#ifdef、#els 和#endif。

2. 事件驱动和 when 语句

Neuron C 中，控制程序中采用事件驱动（event driven）方式进行任务调度，程序中的 when 语句中的条件变为真，则条件关联的应用程序代码被执行。被执行的任务有优先级的不同，执行的顺序也不同。

在事件驱动方式中，一个 when 语句就是一个表达式，当表达式描述的条件为真时，表达式后面的任务代码被执行。一个简单的 when 语句和实现定时关闭一只 LED 灯的控制情况如下：

```
when(timer_expires(led_timer))
{
    //turn off the LED
    io_out(io_led,OFF)
}
```

语句中，已经在程序的其他部分定义过的 led_timer 软件定时器设定时间到达后，turn off the LED io_out（io_led，OFF）代码段被执行，完成 LED 灯的关闭。

定义在 when 语句中的事件一般分为两种类型：预定义事件和用户定义事件。预定义事件包括输入引脚状态的改变、网络变量的改变、计时器终止和报文的接收等，用户定义事件可以使用任何有效的 Neuron C 表达式。

用户定义事件和预定义事件的区别并不是非常严格的，但由于预定义事件使用的代码空间较少，因此要尽可能使用预定义事件。

（1） 预定义事件

前面出现过的事件 timer_expires 是一种类型的预定义事件，某些 I/O 事件和网络变量事件，其后面可能加有修饰符（modifier）以限制事件的作用域。常使用的预定义事件如下：

```
io_changes            //输入 I/O 对象的输入值发生改变
io_update_occurs      //输入 I/O 对象值改变,只对定时器/计数器 I/O 对象有效
nv_update_occurs      //输入网络变量接收到新值
nv_update_completes   //输出网络变量发送完成
nv_update_fails       //输出网络变量发送失败
nv_update_succeeds    //输出网络变量发送成功
offline               //接收到 offline(使节点离线)网络管理报文
online                //接收到 online(使节点在线工作)网络管理报文
reset                 //Neuron 芯片被复位
timer_expires         //定时器定时间隔到
```

预定义事件还可以用作子表达式，包括在 if、while 和 for 语句的控制表达式里，例如：

```
#define OFF 0              //预定义 OFF 为 0
IO0 output bit io_led;     //定义 IO0 引脚为输出 I/O 对象,且为 bit(只有高、低两种电平)类
                           型
```

```
mtimert;                    //定义一个以毫秒为计时单位的软件定时器 t
when(事件)
{  …
    if(timer_expires(t))    //定时器 t 时间到时为真
    io_out(io_led,OFF);     //io_led 输出 I/O 对象对应的 IO0 引脚输出低电平
    …
}
```

在使用 Neuron C 编程的过程中，任何内部预定义事件关键字表达式（例如 timer_expires（t））与其他子表达式和任何被标准 C 表达式语法允许的组合都被同等对待。

（2）用户定义（user_defined）事件

用户定义事件可以包含赋值和函数调用，在用户定义的事件内，只能对全局变量赋值。例如：

```
int a;
…
when(a = =0)   //用户自定义 a =0 时间为真时,执行后面的程序代码
{
  …
}
```

（3）reset（复位）事件

在 Neuron 芯片由于某种原因被复位（如芯片刚上电、人为将 $\overline{\text{RESET}}$ 引脚接低电平等）后 reset 事件为真。芯片被复位后所执行的第一个任务为 reset 事件后的任务。格式为：when（reset）

（4）when 语句的调度

调度程序以由上到下循环的方式检测 when 语句，每一个 when 语句都由调度程序检测，如果为真（TRUE），则与其相关联的任务就被执行；如果 when 语句为假（FALSE），调度程序将继续检查后面的 when 语句。在检查完最后一个 when 语句后，调度又返回至队列首部重复执行上述过程。

when 语句的语法如下：

```
[priority] when（事件）
{
  …
}
```

Priority 关键字用于设定优先级 when 语句，这种 when 语句被检测的次数多于无优先级的 when 语句。如果任何优先级 when 语句被检测为真，则与它相对应的任务就被执行，然后调度程序又重新回到第一个优先级 when 语句处，从头开始检测优先级 when 语句。如果任何一个优先级 when 语句都没有被检测为真，调度程序才以如前所述的循环方式检测无优先级 when 语句。如果选上的无优先级 when 语句检测为真，它的任务被执行，然后调度程序重新回到第一个优先级 when 语句处；如果该无优先级 when 语句被检测为假，则它的任务被忽略，调度程序重新回到第一个优先级 when 语句处。

使用优先级 when 语句必须仔细考虑。因为优先级 when 语句太多的话，将使无优先级的 when 语句被“挂起”，即不被执行。如果一个优先级 when 语句在大部分时间里都为真，它将独占处理器时间。

7.1.7　I/O 对象

在使用 Neuron 芯片的 I/O 功能之前，必须首先说明用 11 个 I/O 引脚的 I/O 对象，这些引脚命名为 IO_0、IO_1、…、IO_10。不能使用没有说明的引脚，此时引脚处于高阻状态。

Neuron C 可以使用的 I/O 对象有多种，包括：直接（direct）I/O 对象、定时器/计数器（timer/counter）I/O 对象、串行（serial）I/O 对象和并行（parallel）I/O 对象。直接 I/O 对象基于 I/O 引脚的逻辑电平，这些 I/O 对象不使用任何 Neuron 芯片的硬件定时器/计数器，可以使用这些对象在同一个 Neuron 芯片内实现多路复用、叠加组合；定时器/计数器 I/O 对象使用 Neuron 芯片内部的硬件定时器/计数器电路，Neuron 芯片有两个定时器/计数器电路，其中一个输入可以多路复用，另一个有专用的输入引脚，主要用于检测节点的模拟量输入信号或输出模拟量信号对阀门等进行控制。

1. Neuron C 支持的内部 I/O 函数

为实现 I/O 功能，需要使用内部 I/O 函数 io_in（）、io_out（）等来读取 I/O 对象的状态和输出相应的 I/O 控制信号。

（1）io_in（）函数

用来检测 I/O 对象的状态，并返回所检测的值。

语法：return_value = io_in（I/O 对象名［，参数］）；

例如，对于 bit（位）I/O 对象，被设置为该类型的 I/O 引脚只能输出或检测高、低两种电平信号。当用 io_in 函数读取 bit 输入 I/O 对象的状态时，若相应的 Neuron 芯片 I/O 引脚为低电平，则将返回 0 赋给函数的返回值，若相应 I/O 引脚为高电平，则返回 1。

上面的参数项按照各种不同 I/O 对象类型的实际需要加以设置。

（2）io_out（）函数

用来控制输出 I/O 对象的状态。

语法：io_out（I/O 对象名，输出值［，参数］）；

例如，对于 bit 类型的 I/O 对象，当输出值为 1 时，相应的输出引脚输出高电平（5V），若为 0，则输出低电平（0V）。

2. I/O 对象事件

利用 Neuron C 支持的内部 I/O 对象事件，可以根据 Neuron 芯片外接传感器、变送器、开关等设备的状态来执行相应的任务。

（1）io_changes 事件

用来判断输入 I/O 对象的状态是否发生改变。

语法：io_changes（I/O 对象名）［by *value* | to *value*］

by 修饰字的作用：从上一次该事件为真后，若 I/O 对象改变了 *value* 所对应的量，io_changes 事件为真；

to 修饰字的作用：若 I/O 对象改变为 *value* 所对应的值，io_changes 事件为真。

若未加修饰字，则 I/O 对象状态发生变化时，事件为真。例如对应于 bit 类型的对象，当与之对应的 I/O 引脚的高、低电平状态发生改变时，该事件为真。

（2）io_update_occurs 事件

只适用于定时器/计数器 I/O 对象，用来判断定时器/计数器输入 I/O 对象是否有更新值。

语法：io_update_occurs（网络变量名）

当输入定时器/计数器 I/O 对象有更新值时，该事件为真。

3. input_value 内部变量

input_value 是 Neuron C 的内部变量，是 unsigned long 类型，它用来表示输入 I/O 对象读取的状态值，只在 io_changes 或 io_update_occurs 事件发生后有效，input_value 可以像其他的 Neuron C 变量一样使用。

例如，如果使用的是 bit 类型的 I/O 对象，则当检测到 I/O 引脚的状态由低电平变为高电平时，io_changes 事件为真，则 input_value 内部变量自动变为 1；反之，input_value 内部变量自动变为 0。

7.1.8 网络变量

LonTalk 协议推出网络变量（Network Variable）新概念。网络变量大大简化了具有互可操作性、使用多个厂商产品的 LonWorks 应用程序的设计工作，而且方便了以信息为基础而不是以指令为基础的控制系统的设计。所谓网络变量是指一个特定的设备应用程序期望从网上其他设备获得的（输入网络变量）或期望向网上其他设备提供的（输出网络变量）任何数据项（温度、开关值或执行器位置设定等）。

设备中的应用程序根本不需要知道输入网络变量由何处来，输出网络变量往何处去。应用程序具有输出网络变量新值时它就简单地把新值发给设备固件。通过一个在网络设计过程中产生的称为“绑定（binding）”的过程，设备固件被配置成知道网上要求这个网络变量的其他设备或设备组的逻辑地址，于是它就汇集并发送合适的数据包到这些设备。类似地，当设备固件收到应用程序所需的输入网络变量的更新值时，它就把该数据发给应用程序。这样，绑定过程就在一个设备的输出网络变量和另一设备或设备组的输入网络变量间建立了逻辑联系。这样的连接也可以看作“虚拟线路”。假如一个设备包含一个物理开关，具有称为“switch on/off”的输出网络变量而另一个设备驱动一个灯泡，具有相应的称为“lamp on/off”的输入网络变量，把这两个网络变量绑定起来建立的连接具有像从开关到灯泡的同样的功能效应。

每个网络变量具有类型，它定义包含在网络变量内的数据的单位、比例和结构，只有相同类型的网络变量才能连接。这可以防止发生通常的安装错误，例如，压力输出连接到温度输入。有类型转换程序可把网络变量从一个类型转换成另一个类型。如下一章中介绍的那样，对通常使用的类型定义了一套标准网络变量类型（SNVT）。另外，制造商为他们自己的用户定义网络变量类型（UNVT）。

LonWorks 系统中的各个节点之间的通信是通过节点提供的网络变量或报文来实现的，网络变量是节点中的一个对象，可以与一个或多个其他节点的网络变量相连接，用于在网络上互传信息。网络变量可以为输入，也可以为输出，允许在控制网络中共享数据。无论何时，如果一个程序更新了它的输出网络变量的值，则该值将会通过网络传给所有与该输出变量相关联节点的输入网络变量。虽然网络变量通过 LonTalk 报文传播，但报文的传送是透明的，应用程序不需要任何显式的指令来接收或发送更新后的网络变量。

节点在通过 SERVICE 引脚安装在网络上后，可以与网络上的其他节点通过网络变量进行逻辑连接，此时发送方节点的网络变量类型必须和接收方网络变量数据类型相匹配。LonTalk 协议提供有标准网络变量类型（SNVT），是对互操作性的进一步支持，SNVT 是具有相应单位（如 V、℃、m 等）的预定义类型的集合，是由 Neuron C 内部定义的变量类型，用户可以根据实际需要选用，具体类型可参考 Echelon 公司提供的标准网络变量表。

在每个互相独立的节点程序中，对所使用的网络变量首先要加以定义，然后才能使用。需要将节点中的输出网络变量与另外一个或多个节点中的输入网络变量先行进行连接（connect）才能实现通信功能。

在 Neuron 芯片上运行的 Neuron C 应用程序最多可声明 62 个网络变量。主机（host）应用程序可以声明更多的网络变量，最多可达 4096 个。

网络变量定义语法为

network input | output［修饰字］［存储类］网络变量类型
［连接信息］网络变量名［ = 初始值］;

如果定义数组网络变量（一维），语法为

network input | output［修饰字］［存储类］网络变量类型
［连接信息］网络变量名［数组长度］［ = 初始值］;

1. input | output

说明是输入网络变量，还是输出网络变量。

2. 网络变量修饰字（可选）

有关的修饰字如下：

（1） sync | synchronized

定义网络变量为同步网络变量。只要发生同步网络变量的赋值，所赋的值必须一一发送，不丢一个值。如果定义时没有设置该选项，即非同步网络变量，调度程序就不能保证每次赋予的值都能被发送出去，例如，如果网络变量赋值过于频繁以至于调度程序来不及传送，那么调度程序将丢掉某些中间值。

（2） polled

仅为输出网络变量选用，定义网络变量为轮询输出网络变量，只有在该网络变量的接收方节点发送轮询请求（使用 poll（） 函数）时，该网络变量的值作为响应才被发送。

（3） d_string

用于设置网络变量的自编文件串，最长为 1023B。这个修饰字在每个网络变量定义时只能出现一次，且放在 sync 或 polled 修饰字后面。sync 和 polled 不能同时使用。

3. 网络变量的存储类别

可选择以下 3 种：

（1） const

指定应用程序不能修改的网络变量。该类别的输出网络变量存放在 ROM 或 EEPROM 中，输入网络变量则存放在 RAM 中。

（2） eeprom

允许应用程序将网络变量值存放到 EEPROM 或闪存内，以免节点掉电时有些数据会丢失。使用该类别网络变量时要注意，对其修改次数有限。当程序装载时，该类别网络变量的初始值生效，复位后这些变量不会再初始化。

（3） config

由输入网络变量使用，指定存放在 EEPROM 中的 const 类别的网络变量只能由另一个节点修改，这类网络变量通常由网络管理器用来配置应用。

某个网络变量的存储类别可以是上述 3 种的组合，如果没有指定存储类别，网络变量就是全局变量，存放在 Neuron 芯片的 RAM 内。

4. 网络变量连接信息

用来指定网络变量连接的各可选属性：

（1） offline

用于告知网络管理器在对该网络变量修改之前，节点应离线（offline），该选项通常由 config 类别的网络变量选用。

（2） unackd | unackd_rpt | ackd ［（config | nonconfig）］

指定网络变量采用的 LonTalk 协议报文服务类型，允许的报文服务类型有：非应答、非应答重发以及应答服务（默认）。若选择 config，则允许网络管理器在安装节点时修改消息服务类型，若选择 nonconfig，网络管理器不能修改报文服务类型。

（3） authenticated | nonauthenticated ［（config | nonconfig）］

指定网络变量修改是否需要鉴别认证服务，如果选用 authenticated，接收方节点将对发送方节点的身份进行鉴别，如果身份不符可以拒收网络变量值，这里也可以用 auth | nonauth。config 和 nonconfig 用于指定网络管理器是否可以修改鉴别服务的选择，默认是 nonauth（config）。

（4） priority | nonpriority ［（config | nonconfig）］

指定该网络变量的修改消息是否能优先传送。config 和 nonconfig 用于指定网络管理器是否可以修改优先服务的选择。默认是 nonpriority（config）。

以上各选项的前后顺序不受限制。

7.1.9 LON 网络

1. 开放式控制网络

传统控制系统中，把来自不同厂商生产的数字控制器互联困难重重。不同系统中不兼容的通信协议使人们努力把分离的系统用继电器、定制网关连接起来。使用继电器、网关并不能将异构系统实现无缝连接。

通过网关和定制程序来实现异构系统的互联，系统可靠性会降低。一旦系统完成，用户就永远不能摆脱提供网关和定制程序的厂家了，形成一种排除第三方的依赖。

目前工控、楼宇领域应用中大部分控制系统中典型的集中控制体系结构如图 7-21 所示。图 7-21 中的传感器和执行器和辅助面板通过接线连接，然后再通过专用主/从通信总线连接到控制面板。控制面板包括一个高性能微处理器，运行一个定制的实现特定监控目的的应用程序，为连接在它上面的所有 I/O 点实施控制逻辑。在较大系统中，控制器可以在另一个专用通信总线上和其他控制器通信。传感器和执行器通常是无智能的 I/O 设备，即现场传感器和执行器是无智能装置和彼此间无通信能力。这种系统通常有专用的中央监控主机监测、控制和管理的人机界面，每个系统必须有一个定制的应用程序。该应用软件使用专用编程语言和非标准的随制造商而异的软件工具来开发。不幸的是，制造商并不试图为工具或编程模式推行标准化。

网络节点如果是智能节点，节点之间能够彼此实现通信，将这些智能节点连接起来的网络是开放性很好的控制网络，这种网络中，不需要监测控制器的干预，向设备轮询信息然后转发到其他设备。不需要监测设备负责整个系统的控制算法。网络中的每个设备能直接向网上其他设备发布信息。信息由发送器以数据包形式发送，由一个或多个接收器接收。图 7-22 就是这样的一个开放式控制网。

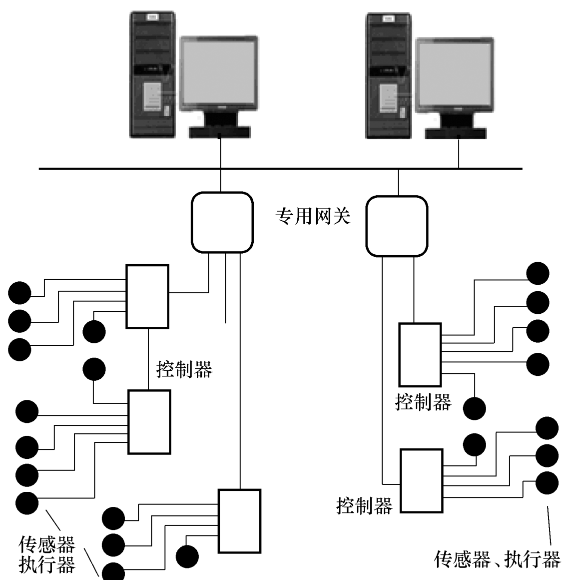


图 7-21 集中控制体系结构

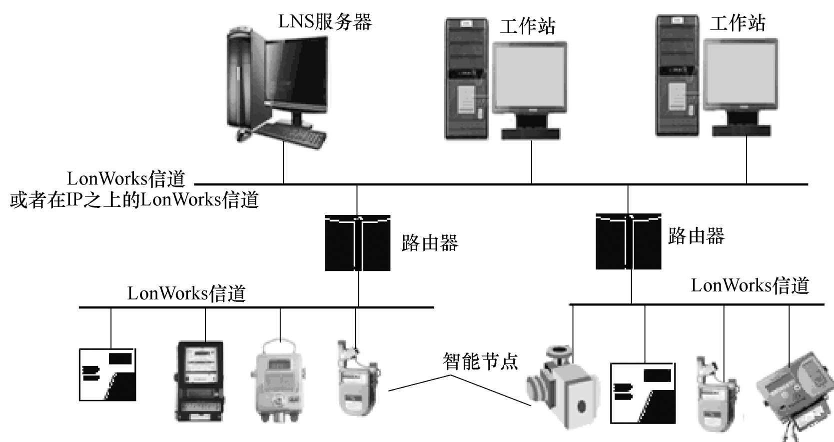


图 7-22　开放式控制网

控制网有许多独特的要求，使其不同于数据网。其中包括：

1）设备之间经常的、可靠的、安全的通信；

2）被传输的信息采用短报文格式；

3）每个设备具备对等的功能性；

4）价位要适合小型、低成本设备。

2. 控制网组件

图 7-23 表示控制网的关键组件。控制网由智能设备组成，它们使用公用协议在一个或多个信道上互相通信。网络设备有时也被称为节点。

每个设备包括一个或多个处理器，并为其提供智能化以及实现协议。每个设备还包括称为收发器的组件，提供到通信信道的电气接口。

通信协议以嵌入式软件或固件代码的形式存储在网络上的每个设备中。信道有不同种类，信道类型的选择会影响传输速度和距离以及网络结构。

3. 对层级结构网络开放性的评价

在控制系统中大量使用层级结构的控制网络，一个典型的分级系统的体系结构如图 7-24 所示。

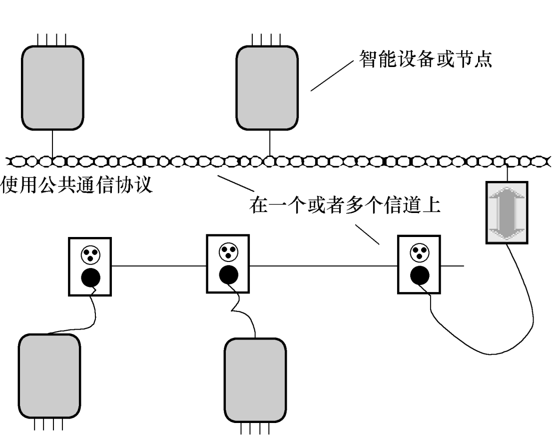


图 7-23　一个控制网络的组成

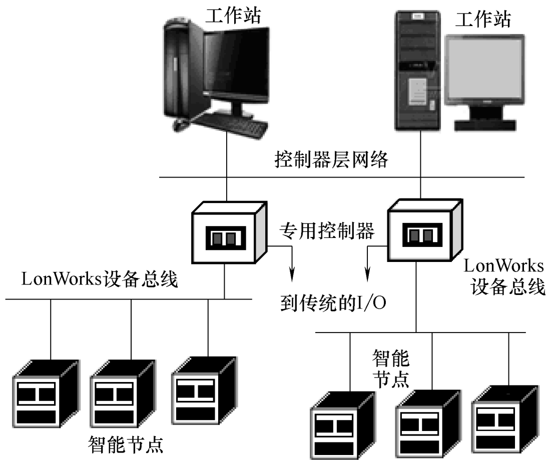


图 7-24　典型的分级系统的体系结构

通过网关实现两个异构网络的互联，通过多个网关将多个不同的异构网络互联，用这种方法实现的互联控制系统开放性还是很不理想的。系统在分级结构的下一层上仍然是封闭的，底层 I/O 设备、终端装置和其他监测控制部件之间的控制关系形成的控制域也是封闭的。

所以分层级结构体系并不是最优化的控制解决方案，原因如下：

1）系统较为复杂；

2）系统专用性强、通用性差；

3）在这样的体系结构下，不可能在任何时间，从网上任何地点和任何点通信。因为体系结构由多个控制层组成，不可能让分离信道上的设备相互直接通信，取得经过不同协议两次转换的数据。这个体系结构限制了设备间的信息流，限制了控制算法实现的便捷性。

4. 5 种 LonWorks 总线网络组态

（1）混合型拓扑的网络组成

LonWorks 总线是性能很优良的控制总线或说控制网络，LonWorks 总线网络结构拓扑灵活，可以使用总线型、星形、环形、混合型等多种拓扑结构，这对于构建系统提供了很大的方便。图 7-25 给出了一个含有环形、总线型和星形网段构成的一个 LonWorks 总线网络的图示。

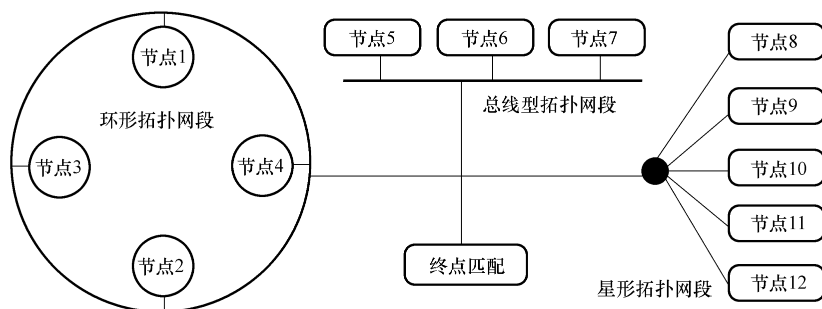


图 7-25　混合型拓扑网络结构

（2）多介质多传输速率的 LonWorks 总线网络

LonWorks 控制网络可将数据检测、数据处理、系统监控功能统一起来。LonWorks 总线网络由控制计算机、现场智能节点、网络适配器和通信介质等组成。

LonWorks 总线网络中的智能节点通过通信介质与周边的外部设备进行通信并实现监控。当控制网络中存在几种不同的通信介质时，可以通过路由器互联。LonWorks 控制网络可以通过网关与其他异构网络相连构成覆盖区域更大的控制网络，如图 7-26 所示。

（3）LonWorks 和 BACnet/IP 等网络构成的组态

与 BACnet/IP 网络、RS-485 和 RS-232 总线构成的混合组态如图 7-27 所示。

（4）LonWorks 逻辑网络

使用网络节点、LonWorks 设备和路由器等实物连接的 LON 网络是物理网络，当使用不同域和子网中的节点组成逻辑上的网络就是 LonWorks 逻辑网络。一个 LonWorks 网络逻辑结构如图 7-28 所示。

LonTalk 地址惟一地确定了 LonTalk 数据包的源节点和目的节点。同时路由器也使用这些地址来确定数据报传输的路由。

为了简化路由，LonTalk 协议采用域、子网和节点地址的分层式逻辑寻址方式。这种寻址方式可以用来对整个域、一个单独的子网或一个单独的节点进行寻址。为了便于对多个分散的节点寻址，LonTalk 协议采用了另外一类使用域和组地址的逻辑寻址方式，简化了在一个功能网络中替换节点的过程，这是因为替换节点被赋予了与被替换节点相同的逻辑地址。

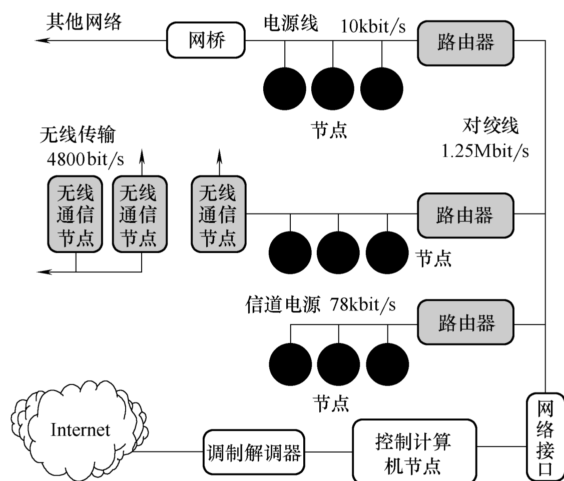


图 7-26　由多种介质不同速率网段组成的 LonWorks 总线网络

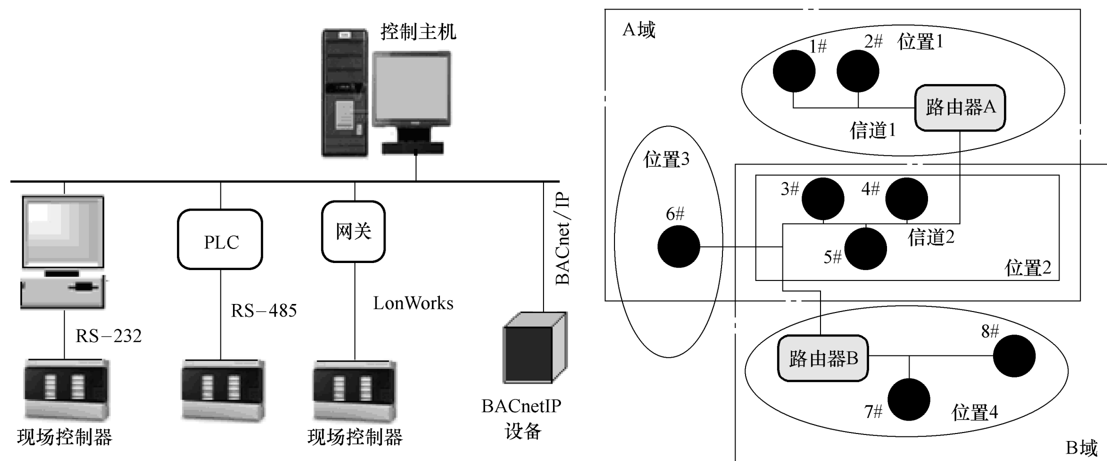


图 7-27　与 BACnet/IP 网络、LonWorks、RS-232 和 RS-485 总线构成的组态

图 7-28　LonWorks 网络逻辑结构图

（5）一个在 BAS 中常用的 LON 网络结构

LonWorks 技术在工业自动化、智能楼宇领域有着很深入地应用，尤其是在楼宇自动化领域中的应用。一个在 BAS 中常用的 LON 网络结构如图 7-29 所示。

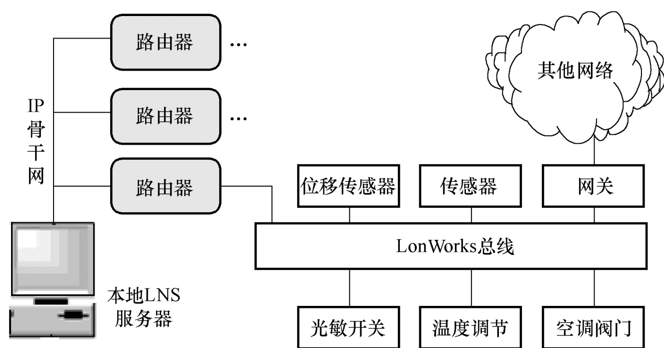


图 7-29　一个在 BAS 中常用的 LON 网络结构

7.1.10　LonWorks 总线网络在 BAS 中的应用

对于 BAS 来讲，建筑内的被控设备和检测传感器分布在楼宇的各个不同位置，如空调机、新风机、冷冻机、风机盘管、锅炉、换热设备、发电机组、电梯、给排水设备、火灾报警、保安监控、照明配电等设备，这些设备附近一般要配置检测传感器。LonWorks 总线技术可以实现对建筑物内所有机电设备进行全面控制的目的，LonWorks 总线网络可以构造实现在控制层提供互操作的测控系统，控制的实时性好。

LonWorks 技术通过网络变量把较复杂的网络通信设计简化为参数设置。LonWorks 网络规模可大可小，小到几十个设备，大则可以挂入上百万个设备。

一个基于 LonWorks 技术的 BAS 结构如图 7-30 所示。

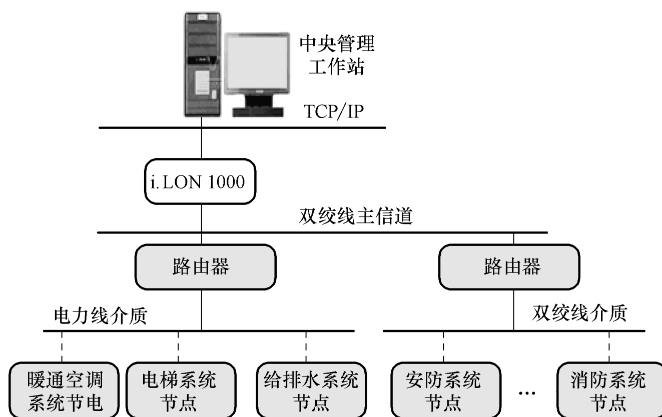


图 7-30　基于 LonWorks 的 BAS 结构

图 7-30 中的 i. LON 1000 是 LonWorks/IP 服务器，就是一个实现从 LonWorks 网络到 Internet 连接的服务器，i. LON 1000 Internet 服务器是一个高性能的网络接口，它可以连接 LonWorks 网络到企业 IP 网络或者 Internet。它内置了一个 Web Server，可以基于 Web 方式工作。中央管理工作站直接挂接在基于 TCP/IP 的信息域网络上，暖通空调系统、电梯系统、安防系统等都直接接在控制域网络中，这里的控制域网络就是 LonWorks 网络。i. LON 1000 是 LonWorks/IP 服务器，通过它使 LonWorks 网络与信息网络互联，建立起复杂、高性能的分布式控制系统，i. LON 1000 LonWorks/IP 服务器的外观如图 7-31 所示。

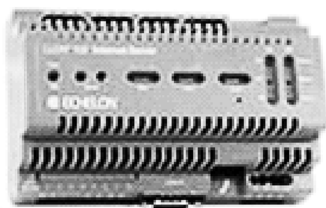


图 7-31　i. LON 1000 LonWorks/IP 服务器

7.1.11　LonWorks 总线网络与 Internet 的互联

在 BAS 中，如果用 LonWorks 总线网络作为一个网段挂接一部分 BAS 中的传感器和执行器，LonWorks 总线网络还要和上一级高速网络—管理总线之间进行连接。用户可以使用局域网、广域网、Internet 实现与 LonWorks 控制网络中的工作站、传感器、执行器等进行无缝互联及通信。i. LON 1000 LonWorks/IP 服务器使用隧道（Tunneling）技术通过 IP 网络将用户的监控指令和服务请求发送至目标节点的传感器、执行器或工作站，实现远程的在线监控如图 7-32 所示。

LonTalk 通信协议支持 ISO/OSI 的所有七层模型，LonTalk 协议是分层的、基于数据包传递的、点对点的通信协议，通过其特定的神经元芯片（Neuron Chip）上的硬件和固件实现，提供

介质存取、事务确认通信服务，还有一些先进服务如接收认证、优先级传输、单一广播/组播消息发送等。

LonWorks的控制网络结构灵活多变，可以是总线型、星形、环形和混合型，可根据建筑物的结构特点采用不同的网络连接方式。可以最大限度地降低布线系统的复杂性和工作量，提高系统可靠性、可维护性，充分满足楼宇设备的自动控制要求。

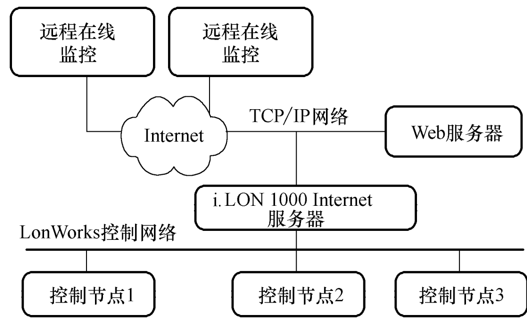


图7-32 远程的在线监控LonWorks网络中的设备

LNS网络操作系统是为LonWorks控制网络提供监测、管理的、安装和设置服务的通用的、网络化服务的操作系统。它保证了网络工具和应用之间的互操作性，提供了一个支持LonWorks网络互操作应用的标准平台，是设计、组态、安装和维护LonWorks系统的互操作工具及应用的基础。对应用程序来说，通过LNS COM组件的标准接口，访问LonWorks网络设备，遵循统一的访问规则，有利于在不同的应用中共享资源。

7.1.12 i.LON 600 LonWorks/IP服务器

i.LON 600 LonWorks/IP服务器的外观如图7-33所示。

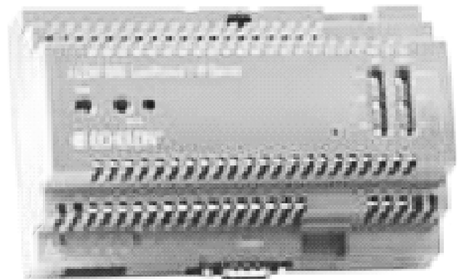
1. 特性

1）安全特性包括使用MD 5认证的安全访问机制；

2）提供高性能的LonWorks控制数据包的第三层路由选择；

3）支持LonWorks/IP信道，每个信道至多256个设备；

4）在使用NAT协议的防火墙后面可以连接多个设备；


图7-33 i.LON 600 LonWorks/IP服务器

5）遵从EIA-852和ANSI/EIA 709.1协议；

6）可选择AC/DC 24V或者AC/DC 90～240V电源输入。

2. 技术特点

i.LON 600 LonWorks/IP服务器是一个遵从EIA 852协议的LonTalk到IP的路由器，它为日常设备的存取访问提供一个可靠的、安全的Internet通道，这些日常设备包括各类传感器、执行器和变送器以及照明设备等。i.LON 600 LonWorks/IP很适合过程控制、楼宇自动化、公共设施、交通运输以及电信等领域等应用。

i.LON 600 LonWorks/IP服务器将Internet或者任何基于10/100 Base-T的LAN或者WAN作为传递本地或者远程LonWorks控制信息的通道。它使用MD5认证确保存取访问的安全性，内部采用一个32位RISC处理器和Echelon公司的LonWorks/IP体系结构，从而为高速控制、显示和监视应用程序提供最佳的性能。

在同一个信道上最多可以使用256个i.LON 600 LonWorks/IP服务器，通过一个使用网络地址转换（Network Address Translation，NAT）协议的防火墙可以连接多个设备。

i.LON 600 LonWorks/IP服务器向后兼容i.LON1000 Internet服务器，并且i.LON 600 LonWorks/IP服务器能够和i.LON 1000 Internet服务器并存在同一个网络中。这个特性确保现有的网

络在需要扩展时能够被增加、删除和改变。

i. LON 600 可以选择 TP/FT-10 和 TP/XF-1250 LonWorks 信道。自由拓扑 TP/FT-10 信道提供了最佳的布线灵活性。TP/XF-1250 信道通常用于高性能的工业控制和用作高速的主干信道使用，从而为节点数量众多的应用提供高吞吐量。

7.1.13　计算机网络与 LonWorks 控制网络的比较

Internet 应用是在 TCP/IP 上发展起来的计算机应用，它提供了不同计算机之间的网络信息交流，TCP 是一种有连接的传输协议，在这基础上发展的 UDP 传输协议是一种无连接的数据包传输方式，由于用有连接的传输需要的资源比较多，在控制网络与 Internet 连接的时候一般采用 UDP。HTTP 协议是用在 Web 服务器和浏览器之间的通信协议，主要用在人与计算机之间，XML 是用于计算机之间数据交换的，XML 不仅提供数据交换还可以定义哪些数据进行交换。

OPC（OLE for Process Control，用于过程控制的 OLE）协议是在 Microsoft Windows 操作系统上实现的针对不同控制产品与人机界面的直接交互性标准。表 7-5 给出了 LonWorks 控制网络和计算机网络 Internet/Intranet 的特性比较。

表 7-5　LonWorks 控制网络和计算机网络比较

特　　性	优　　点	LonWorks 控制网络	Internet/Intranet
开放、可靠的通信协议	保证使用相同协议不同厂家产品的互操作	LonTalk 协议	TCP/IP，UDP，HTTP，XML
IC 芯片	低费用	Neuron 芯片	Ethernet 芯片
网络操作系统	统一的网络管理	LNS 网络操作系统	
网络设备	可升级，方便管理	路由器	路由器、交换机
标准化	保证开放、互操作	EIA709.1	IEEE802.x

7.1.14　LonWorks 系统的设计

作为开放式标准向所有制造商提供的 LonWorks 系统是一个平台，使控制系统体系结构以开放式、高度分布的互可操作系统取代专用的集中系统。

1. 全分布式的 LonWorks 系统

控制系统使用开放的、基于标准的对等体系结构可以成为性能非常优良的系统。把控制算法和传统 I/O 接口分布到设备级，从而避免了专用监测控制器和控制网的高成本和复杂性。这样的一个全分布式的 LonWorks 系统如图 7-34 所示。

使用全分布式结构的 LonWorks 系统可以将控制逻辑分布到整个网络上。尽量降低使用网关作为专用监控装置和异构系统实现互联的装置带来的复杂性和较高的费用。

全分布式结构的 LonWorks 系统中的每个智能设备都可以有自己简单的应用程序和控制逻辑，所以控制逻辑可分布于整个系统。

2. 使用 IP 广域网的 LonWorks 系统

如果一个网络控制协议只发送精简的报文，而且只在需要时发送，以及报文只出现在需直接相关的通信设备中，使用这样的网络控制协议组织的系统一定会具备优良的性能。

一种控制网络如果能直接使用高速主干网络作为其应用系统中的一部分，可以避免使用许多专用协议同时又获得了优良的系统性能，如图 7-35 所示，系统在信道之间使用路由器而不用网关。i. LON 600 LonWorks/IP 路由器就是这样的设备。LON 网络中的路由器把 LonWorks 数据包封装成 IP 数据包在 IP 网络上传输。形象地说就是把一个 LonWorks 数据包看作信封内的一封信

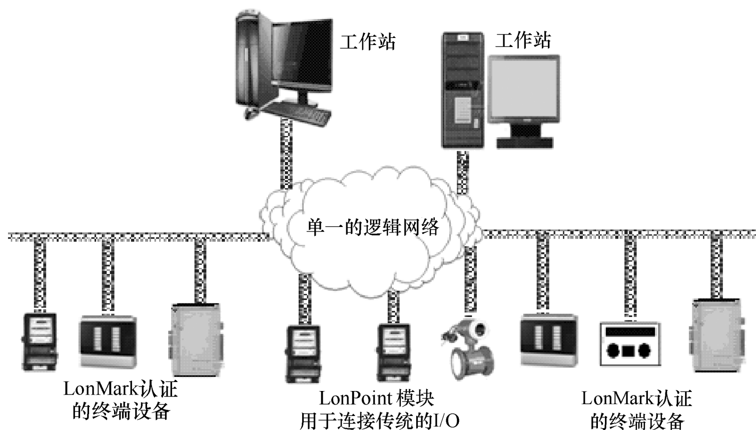


图 7-34　全分布式的 LonWorks 系统

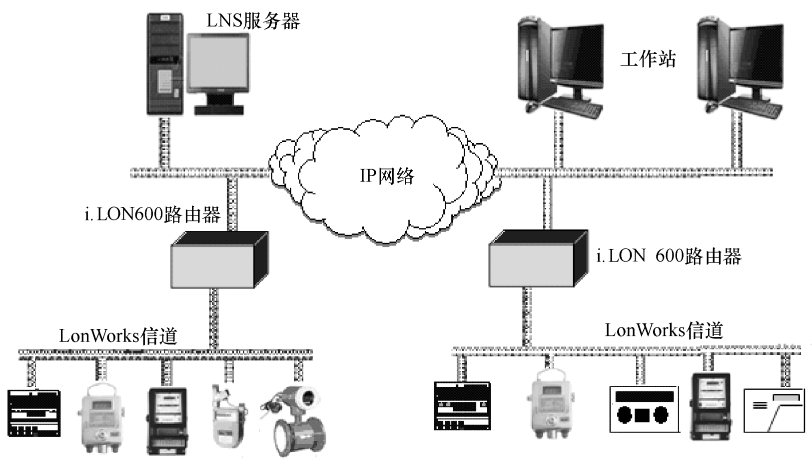


图 7-35　使用 IP 主干网的全分布式 LonWorks 系统

(数据)，通过 LonWorks 网络投递给收信人，那么这些路由器就只是简单地把它封装在一个更大的 IP 信封内，以不同的方式寻址。广域网再把这个大信封传输到被寻址的远地路由器或 IP 设备，在那里把外面信封拆掉，LonWorks 信封则放在局域网分段或设备上。这使得系统易于安装、监测、查找故障和维护，因为系统现是在一个集成的网络，具有所有各点间完全的连通性，没有专用网关置身其间。

LonWorks 网络和 IP 网络之间的路由器提供从 LonWorks 网络段到以太网或广域主干网的无缝、透明连接。

3. 使用本地 LNS 服务器开放的 LonWorks 系统

LNS 服务器和每个 LonWorks 子系统在一地，用于向 LonWorks 信道和 IP 信道两者提供连通性，这种系统如图 7-36 所示。

4. 系统设计

系统具有良好开放性的一个重要表现是：用户系统中的智能设备购于多个不同的厂商，不影响这些智能设备彼此间的互联互通、互换互用，即开放性使集成商和最终用户们能够自由选择最佳种类的产品和服务，而无需害怕被锁定在一家销售商。

系统集成商为了实施一个网络控制系统必须执行 4 个主要任务：系统设计、网络配置、应用程序配置和安装。

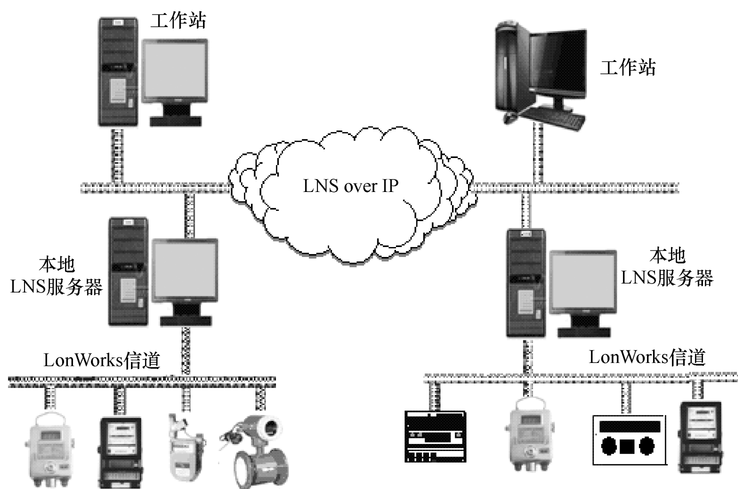


图 7-36　使用本地 LNS 服务器开放的 LonWorks 系统

（1）系统设计

系统设计分两步：第一步选择 LonWorks 设备，该设备必须包含必要的 I/O 点或能连接到 I/O 点，而且具有能执行诸如 PID 环路或时序调度等必要控制功能的合适应用软件。

第二步，确定合适的信道类型和数量，再选择路由器来连接它们。这项工作包括选择网络主干这样的重要决策。较大系统通常使用 IP 作网络主干，中等系统可使用 IP 或 TP/XF-1250 作网络主干，小系统可使用 TP/FT-10 作网络主干。

（2）网络配置

网络配置的步骤如下：

1）把域 ID 和逻辑地址分配给所有设备和设备组。

2）绑定网络变量，在设备间建立逻辑连接。

3）为要求的特点和性能，在每个设备中配置各个 LonWorks 协议参数，包括信道速率、确认、鉴别和优先级服务等。

4）网络配置的内部过程可能很复杂，但这种复杂性被 LonWorks 系统中的网络集成工具解决了，使得进行网络设计是一项简单的工作，就像把设备的应用功能模块拖曳到图上，并连接输入和输出，以确定功能块之间如何相互通信。

5）网络配置可能是一个特设的过程，也可能是一个设计前过程。在特设方法中，设备已经连接到网络并上电，配置数据按规定在网上下载。在设计方法中，信息用网络工具收集到数据库中并在安装时下载到设备中。在任一方法中，网络集成工具都自动维护一个精确反映系统中每个节点配置的数据库。

（3）应用程序配置

每个设备中的应用程序是由应用程序配置流程根据要求的功能定制的，所以要选择适当的配置属性。LNS 网络操作系统为制造商提供一个平台来创建易于使用的叫做 Plug-in 插件程序的图形化配置界面，而该插件程序自动和任何其他基于 LNS 的网络工具相兼容。例如埃施朗公司的 LonPoint 接口模块中的应用软件都有用于配置的 LNS Plug-in 插件程序。在使用 LonMaker for Windows 定义和执行这些设备的网络配置后，用户就能简单地用鼠标右击 LonPoint 功能块图符，从快捷菜单中选择“Configure”，此时应用程序的插件程序立即从 LonMaker 工具中启动。

（4）安装

为信道安装物理通信介质。把包括路由器在内的 LonWorks 设备连接到信道上；把传统 I/O 点连接到 LonWorks 设备上。

使用网络集成工具下载网络配置数据和应用配置数据到每个设备，这称为启动设备。对于未经制造商预装应用程序的设备，网络工具下载应用程序到设备中非易失性的 RAM 存储器中。设备通常是逐一的启动和测试，或者以脱机模式启动，然后再使设备联机逐一测试。开放式集成使控制应用程序能充分利用在控制组件中全部投资，把以前离散系统顺利地集成。这样的集成增加了控制系统的灵活性和对最终用户的价值。

5. 对 IP 网络的支持和网关的作用

（1）对 IP 网络的支持

开放控制系统将控制系统报文或数据包封装在 IP 数据包中，就可以使用 Internet 将报文可在全世界传输而不必转换成另外的协议，实现传输成本最小化，而且充分利用现有丰富的 IP 网络的能力和资源不受任何限制。对 LonWorks 网络的 IP 支持可由 LNS 服务器或者 i. LON600 LonWorks/IP 服务器实现。

（2）网关的使用

使用不同通信协议及标准的控制网络构成各自封闭的不同控制域，在设备间报文从一个通信协议映射到另一个协议时，实质是从一个控制域与另一个控制域之间的通信。报文的映射是由网关来完成的。网关只应用于特定的连接，实现两个不同控制域的互联，是原本不能通信的两个独立控制域能够实现通信，但网关实现的互联不是无缝互联。

网关在近年来已成为控制领域中大量使用的产品，但是这种装置在系统中也构成系统数据流中的瓶颈，而且有内在的性能限制。执行网关功能需要处理能力，而这就带来较高的成本。网关还要求有人指明把什么映射到什么，这会消耗技术力量。此外，网关还难以维护。系统参数的任何改变也必须在网关上处理，这必然会引起网络管理计划的改变。不同的管理计划要求网关两侧有不同的工具，所以为整个系统开发一个公用的网络管理工具即使不是不可能也是很困难的。最后，网关及其网络管理工具是封闭和专用的。因为没有网关配置的开放标准，处理网关配置的网络管理工具也变成封闭和专用的，它们就锁定在单一的网关生产厂商身上。

7.1.15　LonWorks 网络控制技术系统开发实例

1. 软硬件设备概述

Echelon 公司推出 LonWorks 技术以来先后推出了两种强有力的开发工具平台即 LonBuilder 和 NodeBuilder。由于多种原因，LonBuilder 开发工具平台在 2003 年 12 月停止生产，相关的技术支持也于 2004 年 12 月 31 日停止。因此，这里将以最新的 NodeBuilder 3. 1 版本开发工具平台为基础介绍相关技术。

2. NodeBuilder 3. 1 开发工具

NodeBuilder 开发工具是一套用于开发 Neuron 芯片和智能收发器应用程序的软、硬件开发平台。它包括在 Windows 下运行的全套设备开发软件和用于测试、仿真的硬件平台。

3. 硬件部分

（1）LTM-10A 开发平台

提供应用程序的简单仿真环境，支持原始的应用程序开发和测试。

LTM-10A 开发平台包括 LTM-10A 控制模块，其中有 Neuron 芯片、64KB 的 Flash 存储器、32KB 的静态 RAM、客户固件等。其内部采用 10MHz 的石英晶体振荡器。

LTM-10A 开发平台引出 Neuron 芯片的 IO-0 和 IO-4 引脚作为输出、输入引脚，分别接 LED 灯和开关，可进行简单程序调试使用。

其 I/O 扩展口还可以通过扁平电缆连接其他外部仿真调试设备（如 Gizmo4 I/O 调试板或顾客节点等）。

LTM-10A 采用 SMX 兼容收发器，可以根据需求选用 Echelon 公司或第三方提供的不同种类收发器，也可以使用用户自己开发的收发器，以支持不同的通信介质应用开发需要。

LTM-10A 开发平台可采用 9 ~ 12V 直流非稳压电源，或采用 +5V 直流稳压电源，或采用 100 ~ 120V、200 ~ 240V、50 ~ 60Hz 交流供电。

（2） Gizmo4 I/O 调试板

可以与 LTM-10A 开发平台连接，或是直接插入嵌入式控制模块，从而开发原型设备或 I/O 电路，也可开发用于检测，运行 NodeBuilder 范例程序的特别功能设备。同时，Gizmo4 上也包含了一个原型区域，可供安装自己开发的硬件原型设备，或是在调试板上扩展硬件。

Gizmo4 I/O 调试板包括以下功能器件：

1） 1 个 4 × 20 的字符显示器；

2） 2 个 10 位的模拟量输入；

3） 2 个 8 位的模拟量输出；

4） 2 个数字量输入；

5） 2 个数字量输出；

6） 1 个数字旋钮编码器；

7） 1 个扬声器；

8） 1 个实时钟；

9） 1 个温度传感器。

10） 两个分立的 LED。

11） Gizmo4 还有一片 Microchip 的 PIC16F877 微处理器，主要用于处理 LCD、管理板上的 10 位 A-D 转换，并且用软件完成实时的时钟信号功能。

Gizmo4 可以采用 9 ~ 30V 直流供电，也可在连接好 LTM-10A 开发平台后依靠其提供的 5V 电源供电。

LTM-10A 控制模块如图 7-37 所示，Gizmo4 I/O 调试板如图 7-38 所示。

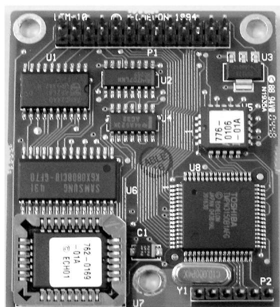


图 7-37 LTM-10A 控制模块

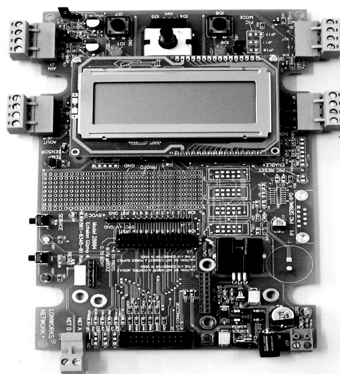


图 7-38 Gizmo4 I/O 调试板

4. 软件部分

（1） LonMaker 3.1 集成工具（标准版） 软件

LonMaker 集成工具（版本 3.1）是一个软件包，它可以用于设计、安装、操作和维护多厂商的、开放的、可互操作的 LonWorks 网络。它以 Echelon 公司的 LNS 网络操作系统为基础，把强

大的客户—服务器体系结构和很容易使用的 Microsoft Visio 用户接口综合起来。这使得 LonMaker 成为一个完善的，并足以用于设计和启动一个分布式的控制网络的工具。同时，它又相当经济，足以作为一个操作和维护工具。

它可实现：

1）为 LonWorks 网络提供图形设计、启动、操作和维护；

2）作为单一工具解决方法还提供用户操作界面组件；

3）包含操作接口组件；

4）支持多用户操作，并能将多个独立的网络合并成一个单一的网络，以加速大型网络的安装；

5）包括对 i. LON 的支持，很容易和 Internet 以及其他 IP 网络集成。

（2）NodeBuilder 软件

NodeBuilder 软件包括：

1）NodeBuilder 3. 1 资源编辑器是一个用于察看标准类型（SNVT）和功能属性（SCPT），并能够定义客户自定义类型（UNVT）和功能属性（UCPT）的工具。类型存储在 LonMark 资源文件中，能够被资源编辑器、代码向导工具、Neuron C 编译器、LonMaker 工具和 Plug-in 向导工具所使用。这确保了所有工具对类型和属性的统一识别，减少了开发时间。

2）NodeBuilder 3. 1 编码向导工具——这是一个用于定义设备的网络接口的工具，它可以使用一个简单的拖放编辑器，然后自动生成实现设备接口的 Neuron C 代码。代码向导工具还可以为每个新的设备节省开发时间。

3）NodeBuilder 3. 1 项目管理工具——这是一个为项目编辑资源代码的工具；它可以用于编译、建立和下载应用程序映像文件到 LTM-10A 平台或者客户自定义硬件；还可以调试运行在 LTM-10A 平台或用户硬件的应用程序。当被用来调试时，在它执行过程中项目管理工具提供一个 Neuron C 源代码级别的应用程序视图，减少了在源代码中确定问题的时间。

4）LNS 设备 Plug-in 向导工具——这个工具用于自动生成一个 VB 应用程序，它可以很容易的配置使用 NodeBuilder 3 工具开发的设备。Plug-in 向导工具为每一个新的设备节省大量的开发时间。NodeBuilder 的主要工具包括必要的开发、测试、制造 LNS Plug-ins 的 LNS 组件在内。LNS 是用于 LonWorks 网络的标准网络操作系统。

（3）LNS DDE Sever 软件（2. 1 版）

LNS DDE Server 是一个软件包，它允许任何 DDE 或者 SuiteLink 相兼容的 Microsoft Windows 应用程序监视和控制 LonWorks 网络而无需编程。用于 LNS DDE Server 的典型的应用程序包括人机界面应用程序、数据记录和趋势分析应用程序以及图像处理显示的接口程序。

LNS 是一个 LonWorks 网络开放的、标准的操作系统。LNS 以强大的客户-服务器体系结构为基础，允许多个安装人员或者维护人员同时访问和修改一个公共数据库。通过建立 LNS 和 Microsoft DDE 协议的连接，与 DDE 相兼容的 Windows 应用程序可以使用以下方法和 LonWorks 节点进行交互：

1）读、监视和修改任何网络变量的值；

2）监视和改变配置属性；

3）接收和发送应用程序消息；

4）测试（Test）、使能（Enable）、禁止（Disable）以及强制（Override）LonMark 对象；

5）测试、闪烁（Wink）以及控制节点。

5. 网络接口卡

网络接口卡是结合 LNS 应用程序的网络服务接口（Network Services Interfaces，NSI）。当 PC

装配有一个 NSI 后，它能够对一个 LonWorks 网络实现系统范围的监控和网络管理。

Echelon 公司提供多种类型的 LonWorks 网络接口卡，包括支持 USB 的 U10/U20 卡、半长的 PCI 卡（PCLTA-21 系列）以及 Type II 型 PC 卡（PCC-10 适配器）。此外，还提供以太网适配器（如 i. LON 10）。

（1）U10 网络接口

U10 网络接口是一个低成本、高性能的 LonWorks 网络接口设备，适用于任何具备 USB 的计算机。

U10 USB 网络接入卡一端为 USB 接口连接计算机主机，一端提供了 TP/FT-10 信道的双绞线连接器，可将 LTM-10A 开发平台或其他使用 TP/FT-10 自由拓扑双绞线收发器的 LonWorks 设备与计算机连接。

（2）i. LON 10 以太网适配器

i. LON 10 以太网 LonTalk®适配器是一个用作连接任何 10Base-T 网络的低成本、高性能的接口，它将用于日常设备诸如家庭、公寓和小型楼宇中的能源控制、照明和安全等系统通过 IP 实现检测、管理和诊断。

i. LON 10 集成了 FTT-10A 或者 PLT-22 收发器，带有可下载的存储器，支持 NSI。它每秒钟能够处理超过 200 个数据包，可以利用电力线或者自由拓扑双绞线连接日常设备。

6. 网络服务器

（1）i. LON 100 e2 Internet 服务器

i. LON 100 e2 Internet 服务器是一个低成本、高性能的网络接口，同时还是一个能够连接 LonWorks 设备、M-Bus 设备和传统设备，并将它们连接到 IP 网络或者因特网的网络设备。i. LON 100 e2 的特点是内置了一个 Web 服务器，因此可以通过 Web 的方式访问 i. LON 100 e2 内置的时序调度、报警处理和数据记录应用程序所有维护的所有数据点。此外，i. LON 100 e2 包括的 Web 绑定功能能够连接多个 LonWorks 域，而且它还提供一个能够用来定制网页以及用作和企业应用相互集成的 SOAP/XML Web Services 接口。

i. LON 100 e2 还内置了用于脉冲表计数和转换局部负载的 I/O 端口。所有数据点和内置的 I/O 端口既能通过 LonWorks 接口也能通过 Web 接口存取访问。

i. LON 100 e2 Internet 服务器还能够用作远程网络接口使用（Remote Network Interface，RNI），从而允许使用基于 LNS 或者 OpenLDV 的工具（包括 LonMaker 集成工具）远程访问整个 LonWorks 网络。

（2）NodeBuilder 开发工具使用

下面通过一个简单的 LonWorks 设备开发过程来了解如何使用 NodeBuilder 的软硬件。

1）首先，单击 Windows“开始”菜单按钮，将鼠标移动到“程序”菜单项，单击“LonMaker for Windows”，从而启动 LonMaker 集成工具。

2）在 General 下，单击“New Network”，创建新的网络。进入到网络创建向导。为网络命名为“test”。单击“next”，LonMaker 集成工具将自动在 LM \ DB 文件夹下生成和网络名一致的数据库文件夹“test”，同时在 LM \ Drawings 文件夹创建和网络名一致的绘图文件夹“test”，并生成以“. vsd”为扩展名的网络图文件。

由于 LonMaker 集成工具以 Microsoft Visio 为用户接口，因此其启动过程将首先以 Microsoft 的 Visio 进行引导。

3）网络接口连接：选中网络接口为连接方式，选中“Network Attached”，选择学要连接的网络接口“LON1”，单击“Next”。

4）进入注册界面，用户可以通过 LonMaker 集成工具对需要使用的插件程序进行注册。在

“Not Registered” 下选择需要注册的程序插件，用鼠标单击 “Add” 使其进入到 “To Be Registered” 框内。也可单击 “Add All” 将为注册的程序插件进行注册，这时集成工具的启动速度将会变慢一些。点击 “Finish” 完成设置过程。

5）程序将启动 LonMaker 集成工具的网络设计界面。

进入到 LonMaker 设计主界面。LonMaker 会自动为其命名为第一个子系统（SubSystem1）。通过在设备模板栏中拖动设备标志到右侧的网络设计界面就可以完成 LON 网络的构建。LonMaker 会自动生成名称为 “Channel1” 的一条网络干道，同时在网络干道上连接有一个显示为绿色的 LonWorks 设备，即为网络接口，绿色表示在线并良好运行的状态。

6）创建一个 LonWorks 设备。

从 LonMaker 设备模板栏中拖动一个开发目标设备（Development Target Device）标志到右侧的网络设计界面。这时 LonMaker 会启动新设备创建向导。为新设备起名为 “node1”，点击 “Next”。

7）LonMaker 弹出确认对话框，确认目标设备的名称和类型。确定无误后，单击 “Start NodeBuilder”，启动 NodeBuilder 创建新设备。

8）在 NodeBuilder 向导下选择 “Creat a new NodeBuilder Project”，创建一个新的 NodeBuilder 项目，点击 “下一步”。

9）确认新的项目名，一般工程项目的名字与所起网络名是一致的。同时 NodeBuilder 会在 LM \ Source 文件夹下创建一个工程项目文件夹 “test”。选中默认这个工程项目对应所创建的网络。点击 “下一步”。

10）确认项目默认设置对话框。在此对话框中，用户将确认工程项目的名称、存放路径、项目所用的收发器设备类型，默认为 “TP/FT-10” 型（支持自由拓扑信道类型的收发器）。选择运行 NodeBuilder 设备模板向导 “Run NodeBuilder device template wizard”，点击 “完成”。就此，NodeBuilder 将完成一个新的工程项目的创建。

11）NodeBuilder 将开启新设备模板向导对话框。为新的设备模板起名为 “node1”，此时 NodeBuilder 将生成一个 “node1. nc” 文件，用户将在此文件中用 Neuron C 语言编写设备将要运行的应用程序。同时 NodeBuilder 在项目文件夹下生成一个设备模板文件夹。未来用户所编写的应用程序代码文件，以及 Build 后生成的设备外部接口文件、输出文件等设备信息文件都将存放在这个文件夹中。点击 “下一步”。

12）设置标准程序定义号（Program ID）。在此，将为每个 LonWorks 应用程序定义惟一的一个用 16 位数字、十六进制数表示的标准程序 ID 号。其格式为 FM：MM：MM：CC：CC：UU：TT：NN，分别代表：格式（F），制造商 ID（M），设备类（C），用途（U），信道类型（T），型号（N）。点击 “Calculator”，进入到 LonMark 标准程序 ID 生成器对话框。在 “Manufacturer” 下选择 “Examples”。

此时将为设备模板生成 Program ID 为 “9F：FF：FF：00：00：00：00：00”。点击 “OK”，退回到 Program ID 对话框，勾选掉 “Automatic program ID management” 下的 “Enable” 项。点击 “下一步”。

13）启动硬件模板定义对话框。硬件模板即是对所开发设备核心部分——控制模块类型的定义。用户可以选择标准的设备模板，也可根据需要自行开发设备模板。这里选择开发设备硬件模板为 “LTM-10A RAM” 型，选择发布硬件模板为 “LTM-10A Flash” 型。不选择 “Run NodeBuilder Code Wizard”[1]。

至此，一个 LonWorks 设备的硬件部分内容已声明完毕，下面将为设备编写需要执行的程序。点击 “完成”，进入到 NodeBuilder 的项目管理工具。

14）NodeBuilder 的项目管理工具。在项目管理工具左侧是项目列表区，显示了设备模板、硬件模板等信息。点击开“Device Templates”下拉菜单，点击“node1”，此时弹出设备模板信息。

7.2 ARCnet

ARCnet 最初由美国 Datapoint 公司于 1977 年成功开发并用于办公局域网中，后来随着以太网技术的发展并成为有线信息域网络的主流技术之后，使办公室网络的需求由 ARCnet 转向以太网。但 ARCnet 网络作为一种工控网络具有良好的时间确定性、数据传输的可靠性和组网的灵活性，使其在工业实时控制系统中有一定范围的应用。ARCnet 技术主要应用于实时控制领域，在楼宇自动化等领域中也有应用，最主要的是 ARCnet 作为楼宇自控领域中的 BACnet 标准定义的五种控制网络的重要成员之一。

ARCnet 常常嵌入到具体系统中，国外很多仪器设备都设有 ARCnet 接口标准。目前全球已有上千万个 ARCnet 节点应用于工业控制领域中。

7.2.1 ARCnet 概述

1. ARCnet 网络应用的特点

ARCnet（Attached Resource Computer net）网络标准属于较早期的网络标准，它采用星形拓扑（但逻辑是以总线传输）。ARCnet 局域网采用了优化的令牌总线协议（IEEE 802.4：令牌总线接入方法和物理层技术标准）作为网络的媒质访问控制方法。令牌在网络内按照给定的逻辑顺序在不同的节点间传递，只有当一个节点取得令牌后，才有权向其他节点发送数据报文，完成报文发送后，再将报文传递到逻辑顺序中的下一个节点。令牌在传递过程中需要占用时间，但 ARCnet 网络不会因发生冲突而等待。在控制网络中，更多的是考虑在最坏情况下的响应时间，而不仅仅是数据的传输速率。ARCnet 网络可以计算出网络在最坏情况下的响应时间，这样，可以在限定的时间里监控关键节点和通信过程。

ARCnet 网络除了具有令牌总线网的一般特点外，还具有如下特点：

1）网络中每个节点保存有下一个节点的逻辑地址，可以生成一个网络活动节点地址表。物理拓扑中节点的空间排序不一定是令牌传递的逻辑拓扑，逻辑环可以按特定的方式进行设置，因此令牌在逻辑环中的传递顺序就已经确定。

2）为了避免目的节点没有空闲缓冲区而引起信息的丢失，设置了空闲缓冲区查询帧，通过查询可以减少不必要的数据重传，提高了网络运行效率。

3）ARCnet 网络的优点为稳定性高、安装价格低廉。

4）适用于中、小型的网络系统；其缺点为不适用于一忙碌或一大型网络中。

ARCnet 是一个开放的标准协议，早在 1999 年就成为美国国家标准 ANSI/ATA 878.1。

ARCnet 网络采用星形拓扑，但逻辑上是总线拓扑传输。ARCnet 网络的优点为稳定性高、安装价格低廉，适用于中、小型的网络系统；其缺点为不适用于大数据流量或大型网络。ARCnet 网络的标准及部分重要特征和技术参数如下：

2. 标准及部分重要特征和技术参数

1）通信标准：ARCnet；

2）传输速率：2.5Mbit/s；

3）媒质访问控制方法：令牌环方法；

4）网络拓扑：实体以星形连接，但逻辑以总线方式传输；

5）传输媒介：RG-62 同轴电缆或 UTP 双绞线。

通过 ARCnet 专属的集线器（Hub）与网络卡构建 ARCnet 网络，ARCnet 网络的集线器分为“主动式”（Active）与“被动式”（Passive）两种。“主动式”集线器可将信号放大后再分送至各接口，适用于较长距离的网络架设；“被动式”集线器不能将信号放大，故仅适用于较短距离的网络架设。

3. 串接 ARCnet 网络的规则

串接 ARCnet 网络的规则：“主动式”集线器可接“主动式”或“被动式”集线器；但“被动式”集线器则仅可串接“主动式”集线器，不能再串接“被动式”集线器。

构建 ARCnet 网络，除了需 ARCnet 集线器外，每台工作站中需安装 ARCnet 网卡。在安装网卡前，必须为网卡设定所在节点的地址，以作为数据传输顺序的依据。

4. 令牌环控制与使用集线器组网的规则

ARCnet 网络的数据传输方式为“令牌环控制”，在 ARCnet 网络中，数据传输方式的顺序是依节点在逻辑环中的序号依序传递的。

ARCnet 网络中的每一个节点其地址范围为 1 ~ 225。每一个节点存储了下一个节点地址（Next ID，NID）。

如果 ARCnet 网络同时用到主动式与被动式两种集线器，组网规则之一是：主动式集线器与各节点间的最大距离不得超过 600m；被动式集线器与各节点间的距离不得超过 30m；若使用同轴电缆，每一区段最大距离不得超过 300m（最多不超过 8 个节点）；若使用双绞线，每一区段最大不得超过 120m（最多不超过 10 个节点）。

7.2.2　ARCnet 逻辑环建立和数据的接收与发送

ARCnet 采用优化令牌总线协议作为媒质访问控制方法。

1. 逻辑环的建立

在 ARCnet 网络中，每个节点均有一个惟一的 MAC 地址，其取值范围为 0 ~ 255，其中 0 是网络广播地址。每一个节点中均存储了 NID。

每个节点在系统初始化或重构时确定它在逻辑环中的下一个节点，并将下一个节点的 ID 值保存在各自专用的寄存器 NID 中，并按 MAC 地址从小到大的顺序构成了一个逻辑环路。图 7-39 所示是一个典型的 5 个节点的逻辑环。

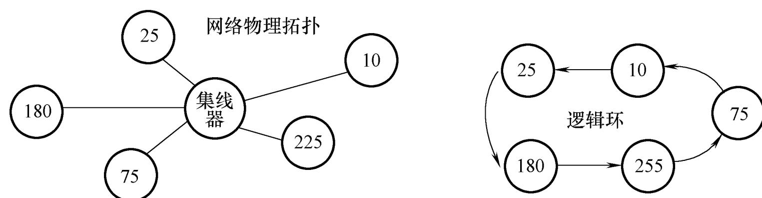


图 7-39　逻辑环的建立

令牌作为一组独特的信号序列，沿着逻辑环顺序循环传递，节点在网络上的物理位置以及网络的逻辑拓扑结构无关。

2. 网络节点的动态入网和退出

ARCnet 网络中的任何一个节点在工作过程中，如果在 840ms（2.5Mbit/s 传输速率下）没有收到令牌，就发出一个重构脉冲，经过重构形成新的逻辑环，在有新节点加入网络时系统发生重构。重构时间的多少取决于网上节点的多少和数据传输速率的大小，通常为 20 ~ 30ms。

当一个节点由于故障或断电而退出网络时不需要进行整个逻辑环的重构，因为当逻辑环的该节点的上一个节点向它发送令牌时，不能收到它的响应，因此故障节点的上一个节点将它的 NID

值加 1，重发令牌，直到收到响应，将令牌送至故障节点的下一个节点，故障节点退出网络。

实际控制领域中 ARCnet 网络的多数故障是节点故障。节点出现故障后，仅该节点退出网络，其他的节点工作不受影响。由于节点推出网络无需网络重构，所以网络故障恢复时间很短。

3. 数据的接收和发送

ARCnet 网络数据传输速率为 156.25kbit/s ~ 10Mbit/s，ARCnet 数据帧中的有效数据长度为 0 ~ 507B，有两种类型数据帧：短帧和长帧。短帧中的用户数据的最大长度为 253B，长帧中的用户数据最大长度为 507B，由于都属于小数据量的数据帧，很适合传递测控指令。用户数据写入协议控制器内置的 2KB RAM 中，在数据发送时，协议控制器会自动将其组织到 ARCnet 的数据帧中。传输数据在协议控制器内置的 2KB RAM 中的存放按照一定格式进行，SID 为源节点地址；DID 为目的结点地址；DID 为 0 表示广播地址。

在数据传送的过程中，一旦源节点 CPU 将待发的用户数据写入协议控制器的内部 RAM，在该节点持有令牌时，相当于接收到令牌传送帧 ITT，首先向目的节点发送一个空闲缓存查询（Free Buffer Enquiry，FBE）帧，查询目的节点是否有足够的接收缓存，目的节点的缓存有接收数据帧的能力和空间，则回答一个确认（Acknowle dgement，ACK）帧，否则回答一个否认（Negative Acknowledgement，NAK）帧。源节点只有收到来自目的节点的 ACK 帧后才向其发送一个含有用户数据的数据（Packet，PAC）帧。如果目的节点收到了数据，且通过了 CRC，则回送一个 ACK 帧，告诉源节点数据接收成功，否则目的节点不回发任何信息，导致源节点超时，源节点认为数据发送失败，等下一次收到令牌时重发该数据帧，至此节点传输过程结束，令牌被传递给下一个节点。图 7-40 所示是节点 156 向节点 255 发送数据包的具体过程。

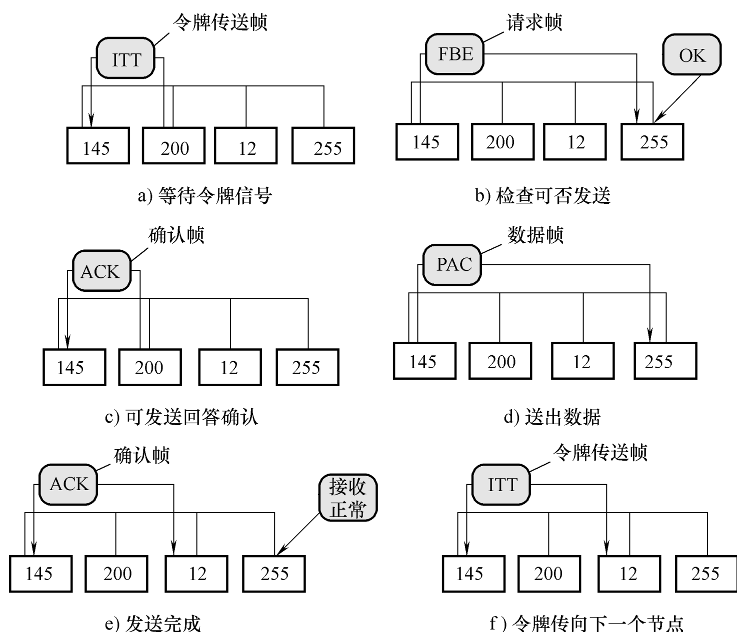


图 7-40　数据的传送过程

ARCnet 支持广播消息。广播消息发出后无需回送确认帧，通过消息广播一次可以将消息传送给网络上的所有节点。

7.2.3　ARCnet 的实时性

衡量通信实时性的指标是通信的延迟时间，即从指令的产生到目的节点收到该指令开始执行

的时间。

1. 通信延迟

ARCnet 的通信延迟时间划分为：生成延迟、令牌等待延迟、传输延迟和接收延迟 4 个部分，如图 7-41 所示，其中，生成延迟为由源节点处理器接收到本节点的请求，到它将准备好的数据写入 ARCnet 控制器内部 RAM 的时刻；令牌等待延迟为从节点传递令牌给下一节点到此节点再次接收到令牌的时刻；传输延迟为从节点收到令牌帧的时刻到将令牌传递给下一节点的时刻；接收延迟为从数据帧脱离总线到将其中的有效数据提供给接收节点微处理器中目标任务的时刻。按照现在的微处理器水平，生成延迟和接收延迟均可忽略不计。故延迟时间可用令牌等待延迟加传输延迟来表示。



图 7-41　通信延迟时间

2. ARCnet 网络中的时间参数

（1）帧长度小和收发响应及介质传输时间短

ARCnet 网络帧长度小，收发响应时间和介质传输时间短。这里的收发响应时间是指 ARCnet 控制器接收数据结束后，从接收状态转换到发送状态，开始对所接收数据作出响应所需要的时间。介质传输时间是指从一个节点发出的电信号到另一个节点收到这个电信号所需的时间。介质传输时间因电缆介质类型的不同而不同。

（2）响应超时

一个节点发送完信息后等待目的节点回答确认的最大时间间隔叫响应超时，计为 T_{rp}。如果响应时间超过了 T_{rp}，则发送信息的节点就认为目的节点已经掉网。T_{rp} 约等于介质传输最大延时的两倍与收发转换时间之和。

（3）恢复时间和网络空闲超时

从响应超时发生到开始传递令牌的时间叫恢复时间，计为 T_n；网络处于空闲状态的最大时间间隔叫网络空闲超时，计为 T_w，发生网络空闲超时将导致网络重构。

ARCnet 网络的实时性可以用以上一些时间参数描述。

3. 传输延迟和令牌等待延迟

传输延迟定义为从节点收到令牌帧到将令牌传递给下一节点的时间。图 7-42 所示为 ARCnet 网络节点发送一次数据包的过程。

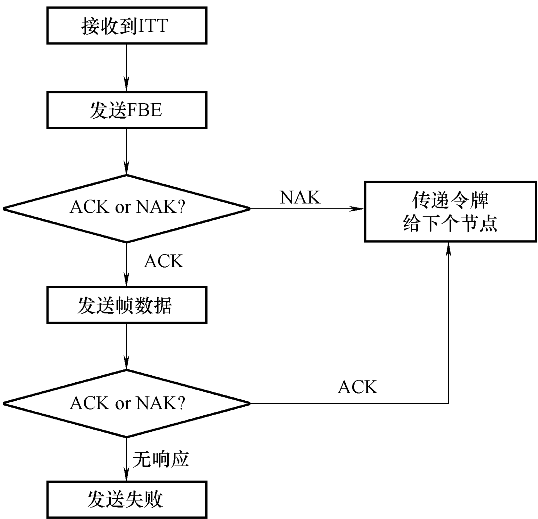


图 7-42　ARCnet 网络发送数据包过程

令牌等待延迟即令牌在网络中循环一周所需的时间。它是令牌环网的一个重要参数，如果每个站都有报文发送，最坏情况下，等待取得令牌和发送报文的时间应该等于全部令牌传送时间和报文发送时间的总和。为了确保网络的实时性，令牌等待延迟时间需要是确定的，这就需要限制每个站发送帧的最大长度。ARCnet 网络中的令牌等待延迟和节点数、网络负载以及是否发生网络重构相关。在令牌传递过程中，如果发生网络重构，则需将

网络重构时间计入令牌等待延迟。网络重构时间与节点数目、节点间传输延迟和最大节点地址相关。

4. 提高网络实时性方法

在 ARCnet 网络中，传输延迟是确定的，令牌等待延迟是根据网络节点数以及负载变化的。当负载增加时，网络实时性会变得较差，因此既要保证网络数据传输的实时性，又要可靠传输所有数据。

在 ARCnet 网络中，每个 VCU、CCU 或 IDU 节点发送的信息实时性不同，根据信息的实时性程度，将其分为强实时数据和弱实时数据。强实时数据要求时限截止前发送；弱实时数据使用强实时数据未使用的带宽资源。网络中每个节点根据信息实时性设置本节点的目标令牌循环时间（Target Token Rotate Time，TTRT），当节点收到令牌后，将连续两次收到令牌之间的时间与本节点目标令牌循环时间 TTRT 相比较，如果小于 TTRT，则表明令牌早到，传输本节点的弱实时数据。如果大于 TTRT，则表明令牌晚到，不传输本节点的弱实时数据，弱实时数据将会在网络负载减轻时得到传输。在 ARCnet 网络中，每个节点数据信息的实时性也会不同，可采用轮询方法来保证强实时性的节点信息及时得到发送。这样，既保证强实时数据的实时性，也使弱实时数据得到可靠传输。

7.2.4 数据链路层

ARCnet 位于 OSI 模型的物理层和数据链路层，ARCnet 实现两个网络节点之间数据帧的发送和接收。每一个 ARCnet 网络节点都包括一个 ARCnet 控制器芯片和一个连接网络的电缆收发器。每个节点都被指定了一个 MAC 地址，而且是惟一的。

ARCnet 是典型的令牌总线技术，采用令牌作为介质访问仲裁的主要手段。为保证 ARCnet 数据链层的可靠工作，尽管集线器构建的星形物理拓扑，网络中的各节点也一样都能监听网络上的所有信息流。通常 ARCnet 网络的数据传输速率是 2.5Mbit/s，多数定时信息的设置都以该速率值为基础。

1. 数据帧的基本编码

基本编码是构成 ARCnet 网络的信息帧和突发性重构请求帧的基本单元。这些基本编码有：

<SD>起始定界码

　　111111（6 位）

　　所有 ARCnet 数据帧都以 6 位逻辑 1 作为一个新帧的开始。

<RSU>重构码

　　111111110（9 位）

<ISU>信息码

　　110dd1d3d4d5d6d7（11 位）

信息码由两部分组成：3 位前导码 110 和 8 位数据信息。ISU 信息码中数据信息的定义和取值：

<SOH>帧起始码，0×01，用作标识一个帧。

<ENQ>PBE 请求码，0×85，用来表示一个 PBE 请求（请求知悉目标节点是否有足够的缓存接收新的一个数据帧）。

<ACK>确认码，0×86，表示确认回答。

<NAK>否认码，0×15，表示否认回答。

<EOT>发送结束码，0×04，表示将令牌传递个 ARCnet 网络逻辑拓扑中的下一个节点。

<NID>下游节点标识码，0×01 到 0×FF。表示逻辑环下游节点。NID 是当前持有令牌节点

的逻辑下游节点的 MAC 地址。

<SID>源节点标识码，0×01 到 0×FF。表示帧的源节点 MAC 地址。

<DID>目的节点标识码，0×01 到 0×FF。表示帧的目的节点 MAC 地址。

<CP>数据长度标识码，表示帧的长度，即字节数。对短帧（0～252B）而言，CP 只占用一个 ISU（信息码）；对长帧（256～507B），CP 则需要两个 ISU。

<SC>系统码，0×01 到 0×FF。用来表示上层协议。通常 SC 仅需一个 ISU，但有些 SC 占用两个 ISU。

<DADA>数据域，用来存放用户数据。短帧模式允许有 0～252 个 ISU；长帧模式允许有 256～507 个 ISU。不能发送 ISU 数为 253、254 或 255 的帧。对这三种长度的例外帧，发送时必须先用 0 填充为长帧，再作为长帧发送。

<FCS>帧校验序列，0×0000 到 0×FFFF，表示帧末尾的 16 位 CRC，占 2 个 ISU。

2. 帧格式

帧有上述基本编码组成。ARCnet 有两种帧格式：基本帧、突发性重构请求帧。基本帧用于节点间的控制信息和数据交互；突发性重构请求帧用于网络重构。

（1）基本帧

ARCnet 数据链路层协议只支持 5 类基本帧：

1）ITT：令牌传递帧

<SD> <EOT> <NID> <NID>

2）FBE：FBE 请求帧

<SD> <ENQ> <DID> <DID>

3）ACK：确认帧

<SD> <ACK>

4）NAK：否认帧

<SD> <NAK>

5）PAC：数据帧

<SD> <SOH> <SID> <DID> <DID> <CP> <SC> <……DATA>
<FCS>

对于这 5 类帧，传递令牌时，逻辑邻居节点地址（NID）要发送两次。确认帧或否认帧是目的节点发回的，所以就不包括源节点地址。FCE 请求帧只是用来查询目的节点是否有足够的缓存空间来接收下一个帧，该类帧只能来自于源节点，因此也没有必要指定 SID 了。5 类帧中惟一需要指定源节点地址（SID）的只有数据帧。

（2）突发性重构帧

突发性重构帧是一种只用于进行网络重构的特殊帧。该类型帧是节点向网络发送一个足够长时间（765 个 RSU）的拥塞信号，干扰网络上所有的通信活动，确保网络所有节点都知道网络重构即将开始。

3. 系统码

每个 ARCnet 数据帧中，紧跟在数据长度标识码（CP）后面的 SC（系统码）是用来标识上层协议的。ARCnet 支持在一个物理网络中同时使用多种协议（每个协议都有自己的帧格式）。SC 是 ARCnet 数据帧必不可少的一个域。

系统码 0×80 保留用于网络诊断。任何节点在任何时候都可以发送系统码为 0×80 的数据帧。节点会自动放弃所收到的一切系统码为 0×80 的数据帧。

7.2.5　ARCnet 网卡和集线器

集线器是构造 ARCnet 所用关键硬件设备，是组建 ARCnet 网络的主要构件。除集线器外，组建 ARCnet 网络的另一主要构件是 ARCnet 网卡，通常能以同轴电缆和双绞线两种方式之一进行工作。当同轴电缆卡要连接到双绞线网络时，必须使用一种称作 banlun 的设备，这是一种小型设备，可将同轴电缆连接器转换为双绞线连接器。

93Ω 的终接器也是组织 ARCnet 网络的重要硬件构建之一。使用同轴电缆时，任何不用的无源集线器端口或电缆都要用终接器连接；使用双绞线时，终接器插入位于电缆末端的网卡上。

1. ARCnet 网卡

ARCnet 网卡由 3 个部分组成：通信控制器芯片、电缆收发器和网卡支持的总线接口。ARCnet 通信控制器是网卡的核心组件，也是构成 ARCnet 节点的基础。

2. ARCnet 网络中的集线器

ARCnet 网络中的集线器主要功能是为网络扩展提供一种简便的方法。ARCnet 网络中的集线器分为有源集线器和无源集线器。一个 ARCnet 网络集线器的外观如图 7-43 所示。

无源集线器价格低廉，使用时不需要电源供电。无源集线器一般有 4 个端口，用来连接星形结构的同轴电缆收发器。无源集线器的缺点是：①网络最大长度为 200ft[㊀]，每个网段最大长度为 100ft；②不实用的端口必须要连接 93Ω 的终接器。无源集线器只适用于采用星形结构的小型同轴电缆网络，节点数还不能超过 4 个。

有源集线器则需要电源供电，它是一种电路中继器，支持各种传输媒质，覆盖范围较无源集线器远，并且能有效地隔离电缆故障和防止信号在信道上的反射，主要用于分布式星形网络。有源集线器不使用的端口不需要连接终接器，而且有源集线器可以采用级联。有源集线器有内置式和外置式两种，内置式有源集线器带有一块网卡，可以安装到计算机的内部，外置式有源集线器是一个独立的设备。有源集线器只有两个端口，而且每个端口可以连接不同类型的电缆，这样一来等同于实现了不同类型电缆连接的转换，如从同轴电缆到光纤。



图 7-43　一个 ARCnet 网络集线器的外观

7.2.6　ARCnet 的网络结构和最大网络长度

1. ARCnet 的网络结构

ARCnet 主要使用总线型和星形总线结构。

（1）总线型结构

如果使用同轴电缆，ARCnet 的网络总线结构如图 7-44 所示。ARCnet 总线最大长度为 305m，可连接的设备最多为 8 个。设备与总线的连接通过 T 形连接器，该连接器的顶部与电缆相连，底部与网卡相连。电缆两端必须用 93Ω 的电阻终接器。

如果使用双绞线，设备之间的连接采用手拉手菊花链方式，适合双绞线线缆的网卡有两个端口：一个用于连接服务器；另一个用于连接下一个 PC。如此级链时最多可连接 10 个 PC，双绞线最大距离不超过 122m（400ft）。第一个网卡和第二个网卡都必须用 93Ω 终接器终接。

（2）星形总线结构

㊀ 1ft = 0.3048m。

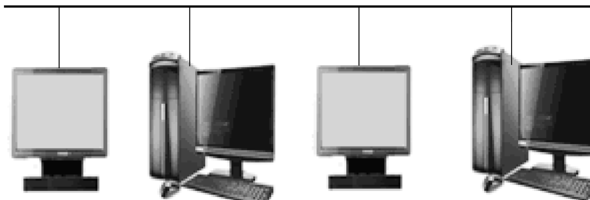


图 7-44　ARCnet 的网络总线结构

这种物理布线是以集线器为中心，形成一种多星形互连在一起的结构，如图 7-45 所示。这种结构之所以称为总线是由于所有工作站共享公共电缆。

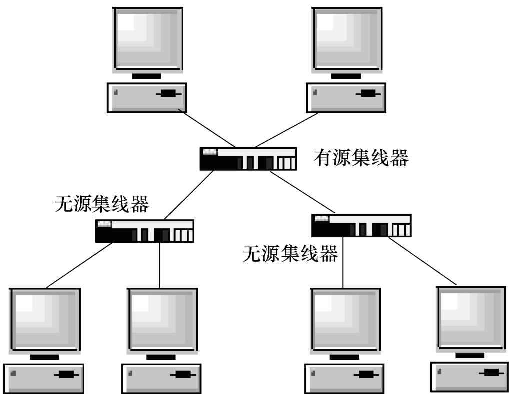


图 7-45　星形结构

这种结构可使用电缆，也可使用双绞线。在使用电缆时，ARCnet 网络的星形总线通过使用集线器将不同的节点连接起来。集线器可以是有源的，也可以是无源的。如果使用有源集线器，工作站与有源集线器的最大距离为 610m。当使用双绞线时，需要使用有源集线器，集线器与文件服务器相连，工作站也与其直接相连。在这种方式下，服务器或工作站与有源集线器之间的距离最大可为 1220m。网卡上不用的端口必须用 93Ω 的终接器短接。

（3）ARCnet 网络的传输介质和最大网段长度的确定

ARCnet 网络一般有 3 类通信介质可供选择：同轴电缆、双绞线和光纤。如果网络中使用有源集线器，则 3 种介质可以混合使用，ARCnet 组网的结构是灵活的。

2. 最大网段长度

网段是指一个完整的网络中去掉集线器之后被分解成若干个分离的部分，每一个分离的部分就是一个网段，没有使用集线器的网络或总线网络中，整个 ARCnet 网络就是一个网段，所有节点都连接到这个网段上。网络中使用了集线器，网络就由多个网段组成。一个网段的最大电缆长度根据使用的收发器与电缆类型不同而不同。ARCnet 节点是指具有一个 ARCnet 设备地址的当前处于工作状态的 ARCnet 控制器芯片。不管是有源集线器还是无源集线器，都不占用 ARCnet 地址，所以集线器设备不是节点。一般情况下，一个网段可以有一个或多个节点，而从集线器到集线器之间连接的网段则可能没有节点。

表 7-6 给出了典型的电缆和网络拓扑结构下网段上最大电缆的长度和最大节点数的对应技术参数。

表 7-6　典型的通信介质和网络拓扑结构下的网段长度

收发器类型	电缆介质	接头	电缆长度/m		总线网段最大节点数	备注
			最小	最大		
同轴星形	RG-62/u	BNC	0	610	N/A	5. 5dB/1000ft[③] max
同轴星形	RG-59/u	BNC	0	457	N/A	7. 0dB/1000ftmax
同轴总线	RG-62/u	BNC	0	305	8	5. 5dB/1000ftmax

（续）

收发器类型	电缆介质	接头	电缆长度/m		总线网线段最大节点数	备注
			最小	最大		
双工光纤(850nm)	50/125	SMA/SI	2①	915	N/A	4.3dB/km max
双工光纤(850nm)	62.5/125	SMA/SI	0	1825	N/A	4.3dB/km max
双工光纤(850nm)	100/140	SMA/SI	0②	2740	N/A	4.0dB/km max
双工光纤(1300nm)	单模光纤	SI	0	14000	N/A	0.5dB/km max
双工光纤(1300nm)	50/125	SI	0②	10000	N/A	1.5dB/km max
双工光纤(1300nm)	62.5/125	SI	0②	10670	N/A	1.5dB/km max
双绞线星形	IBM 三类线	RJ-11	0	100	N/A	用内置 BALUN
双绞线总线形	IBM 三类线	RJ-11，螺钉端子	2①	122	8	
直流耦合 EIA-485	IBM 三类线	RJ-11，螺钉端子	0	274	17	直流耦合
交流耦合 EIA-485	IBM 三类线	RJ-11，螺钉端子	0	213	13	
变压器隔离						

① 指任意两个节点之间或节点与集线器之间的最短距离。
② 可使用跳线设置来达到该距离值。
③ 1ft = 0.3048m。

第 8 章　BACnet 标准与以太网

BACnet 支持的 6 种楼宇自控网络，包括以太网。以太网（Ethernet）是一类满足特定标准规范的计算机局域网，这些特定的标准规范是：IEEE 802.3（ISO/IEC 8802-3）、IEEE 802.12（ISO/IEC 8802-12）和 IEEE 802.11（ISO/IEC 8802-11），或者也可以说：按照 IEEE 802.3（ISO/IEC 8802-3）、IEEE 802.12（ISO/IEC 8802-12）等协议规范连接组织的局域网就是以太网。

BACnet 标准是 1995 年推出的，那时候的以太网技术还处于一个快速发展的时期，工业以太网、实时以太网技术还没有得到充分发展，一部分工业以太网的标准在 2000 年左右才陆续提出来，至于实时以太网的相关标准推出的时间则更晚一些。所以 BACnet 标准支持以太网作为控制网络，不仅是指当时技术发展水平的以太网技术，也包含了以太网技术后来的发展。

8.1　以太网的标准系列

8.1.1　IEEE 802 标准系列

美国电气和电子工程师学会的 IEEE 802 委员会专门从事局域网标准的制定工作，自该学会成立之日起，陆续制定和推出 IEEE 802 局域网规范及系列标准。当 IEEE 将标准规范草案送交国际标准化组织（ISO）批准后，ISO 将 802 规范称为 ISO 8802 标准，因此许多 IEEE 标准也是 ISO 标准。

主要的 IEEE 802 局域网规范及标准系列如下：

1）IEEE 802.1（A）：综述局域网体系结构；

2）IEEE 802.2：逻辑链路控制；

3）IEEE 802.3：CSMA/CD 接入方法和物理层技术标准；

4）IEEE 802.4：令牌传递总线接入方法和物理层技术标准；

5）IEEE 802.5：令牌传送环接入方法和物理层技术标准；

6）IEEE 802.6：城域网（MAN）接入方法和物理层技术标准；

7）IEEE 802.7：宽带技术；

8）IEEE 802.8：光纤技术；

9）IEEE 802.9：综合语音数据局域网；

10）IEEE 802.10：可互操作的局域网安全；

11）IEEE 802.11：无线局域网（WLAN）；

12）IEEE 802.12：优先级轮询局域网；

13）IEEE 802.13：没有使用；

14）IEEE 802.14：基于电缆电视（Cable-TV）的广域网；

15）IEEE 802.15：无线个人区域网（WPAN）（蓝牙）；

16）IEEE 802.16：宽带无线网；

17）IEEE 802.17：弹性分组环（RPR）；

18）IEEE 802.18：无线管制（Radio Regulatory）TAG；

19）IEEE802.19：共存（Coexistence）TAG；

20）IEEE 802.20：移动宽带无线接入（Mobile Broadband Wireless Access，MBWA）；

21）IEEE 802.21：媒体无关切换（Media Independent Handoff）。

8.1.2 IEEE 802.3 以太网标准

IEEE 802.3 以太网标准见表 4-2。

IEEE 802.3 以太网技术的内容较为丰富，随着以太网技术的不断更新和广泛应用，反映以太网技术蓬勃发展的 IEEE 802.3 标准包括的内容也不断充实扩展，并形成相关的 IEEE 802.3 系列标准，使用表格方式将 IEEE 802.3 系列标准的公布时间、网络结构、网络传输介质和最大网段长度等参数进行比较，见表 8-1。

表 8-1 IEEE 802.3 系列标准

以太网标准	公布时间	传输速率/（Mbit/s）	网络结构	采用线路信号码型	网络传输介质	连接器类型	最大网段长度
10Base-5	IEEE 802.3（1983 年）	10	总线型	曼彻斯特	50Ω、10mm 粗同轴电缆（单根）	N 型同轴	半双工：500m
10Base-2	IEEE 802.3a（1983 年）	10	总线型	曼彻斯特	50Ω、5mm 细同轴电缆（单根）	BNC 接头	半双工：185m
10Base-36	IEEE 802.3b（1985 年）	10	总线型	射频调制	单根 75ΩCATV 宽带电缆		半双工：1800m
中继器间光纤链路	IEEE 802.3d（1987 年）	10	星形	曼彻斯特	双芯光缆	SMA 型或 ST 光纤连接器	半双工：1000m；全双工：≥1000m
10Base-T	IEEE 802.3i（1990 年）	10	星形	曼彻斯特	100Ω3 类 UTP	RJ-45 接口	半双工：100m
10Base-FL	IEEE 802.3j（1993 年）	10	点对点链路	曼彻斯特	850nm、1310nm 多模光纤	ST 型光纤连接器	2000m
10Base-FB	IEEE 802.3j（1993 年）	10	点对点链路	曼彻斯特		ST 型光纤连接器	半双工：2000m
10Base-FP	IEEE 802.3j（1993 年）	10	点对点链路	曼彻斯特		ST 型光纤连接器	半双工：500m
100Base-TX	IEEE 802.3u（1995 年）	100	星形	4B/5B	2 对 5 类 UTP 或 STP150Ω 电缆	RJ-45 接口	半/全双工：100m
100Base-T4	IEEE 802.3u（1995 年）	100	星形	8B/6T	4 对 100Ω3 类 UTP 线缆	RJ-45 接口	半双工：100m
100Base-FX	IEEE 802.3u（1995 年）	100	星形	4B/5B	多模 1310nm 光纤	双 SC 或 ST 光纤连接器	半双工：412m；全双工：2000m
100Base-T2	IEEE 802.3y（1997 年）	100（半双工）；200（全双工）	星形	PAM5×5	2 对 100Ω3 类 UTP 线缆	RJ-45 接口	半双工：100m；全双工：≥100m
1000Base-LX	IEEE 802.3z（1998 年）	半双工：1000；全双工：≥1000	星形	8B/10B	多模光纤、单模光纤	双 ST 型光纤连接器	半双工：316m；全双工：≥550m
1000Base-SX	IEEE 802.3z（1998 年）	半双工：1000；全双工：2000	星形	8B/10B	多模光纤、单模光纤	双 ST 型光纤连接器	多模光纤：275m；半双工：316m；全双工：550m
1000Base-CX	IEEE 802.3z（1998 年）	半双工：1000；全双工：2000	星形	8B/10B	专用屏蔽平衡电缆	DB-9 型连接器	半双工：25m；全双工：≥25m

（续）

以太网标准	公布时间	传输速率/（Mbit/s）	网络结构	采用线路信号码型	网络传输介质	连接器类型	最大网段长度
1000Base-T	IEEE 802. 3ab（1999 年）	半双工:1000；全双工:2000	星形	PAM5 ×5	4 对 100Ω5 类 UTP 线缆	RJ-45 接口	半双工:100m；全双工:100m
10G Base-SR	IEEE 802. 3ac（2002 年）	全双工：2000	星形	64B/66B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	
10G Base-SW	IEEE 802. 3ac（2002 年）		星形	64B/66B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	
10G Base-LX4	IEEE 802. 3ac（2002 年）	全双工：2000	星形	8B/10B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	
10G Base-LR	IEEE 802. 3ac（2002 年）		星形	64B/66B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	10km
10G Base-FR	IEEE 802. 3ac（2002 年）		星形	64B/66B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	10km
10G Base-FW	IEEE 802. 3ac（2002 年）		星形	64B/66B	多模光纤、单模光纤	SC 型光纤连接器	10km

8.2　典型以太网技术

8.2.1　10Base-T 网络

10Base-T 网络中，“10”表示该网络的传输速率为 10Mbit/s；“Base”表示基带传输；“T”表示使用双绞线网络电缆。10Base-T 网络采用 IEEE 802. 3i 规范。

10Base-T 网络结构如图 8-1 所示。

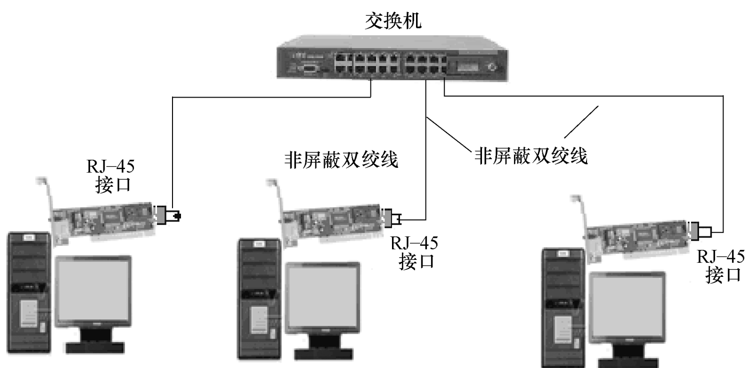


图 8-1　10Base-T 网络结构

硬件设备如下：

1）使用 RJ-45 接口的 10Mbit/s 网卡。

2）10Mbit/s 的交换机。

3）超 5 类 UTP 线缆。

4）使用直通线（B-B 线）连接网卡和交换机。

10Base-T 网络组建快捷便利，故障检测也十分容易，所以目前被广泛采用。网卡与交换机

间的最大支持长度为100m，两台计算机之间的最短线缆长度为2.5m。一个10Base-T网络可接入1024台计算机。10Base-T网络可以通过4个集线器的级联实现网络覆盖范围的扩展。

8.2.2 10Base-F 网络

10Base-F网络也叫光纤以太网，采用IEEE 802.3j规范。10Base-F网络是基于曼彻斯特信号编码传输的10Mbit/s以太网系统，通过编码传输的光缆，用有光表示高电平，无光表示低电平。该网络使用一对光缆：一条光缆用于发送数据，另一条光缆则接收数据。

10Base-F包括10Base-FL、10Base-FB和10Base-FP，它们被定义在IEEE 802.3j标准中。其中10Base-FL使用光纤，用于10Mbit/s的基频信号传输，最大网段距离为2000m；10Base-FB是IEEE 802.3j标准的一部分。它不用于连接用户站点，但能够提供一个同步的信令链路，其允许额外的片段和中继器来连接网络。网络覆盖范围达到2000m；10Base-FP也是10Base-F规范的一部分。它组织了很多计算机到一个星形拓扑结构中而不使用中继器。10Base-FP最大传输距离为500m。

8.2.3 IEEE 802.3u 快速以太网

快速以太网有3种基本的实现方式：100Base-FX、100Base-TX和100Base-T4。每一种规范除了接口电路外都是相同的，接口电路决定了它们使用哪种类型的电缆。为了实现时钟/数据恢复（CDR）功能，100Base-T使用4B/5B编码方式。以上的快速以太网遵从IEEE 802.3u标准。

1. 100Base-T 网络

（1）100Base-T的特点

100Base-T快速以太网是由10Base-T以太网标准发展而来的，网络速度提高了10倍。100Base-T标准为IEEE 802.3u，这就严格限制了网络的传输范围在210m以内。

100Base-T的特点可以从MAC子层和物理层两个方面说明：

1）MAC子层：100Base-T网络保持了与10Mbit/s以太网同样的MAC子层，使用同样的CSMA/CD媒体访问控制方式和相同的帧格式。

100Base-T网络的时槽位数和10Base-T相比，变为5.12μs，于是使100Base-T以太网冲突域的网络跨距也差不多减小了1/10，即200m左右。

2）物理层：

① 物理层结构：100Base-T网络的物理层结构与10Base-T网络的物理层结构有了很大的不同：100Base-T以太网物理层与10Base-T以太网物理层的结构有所不同。100Base-T以太网物理层包含的6个部分：媒体无关接口、物理媒体相关子层、协调子层（RS）、物理编码子层、物理媒体连接子层和媒体相关接口。

② 支持多种媒体和组态：100Base-T网络和10Base-T网络的区别在物理层标准和网络设计方面。100Base-T的物理层包含4种媒体选项：100Base-TX、100Base-FX、100Base-T2和100Base-T4。

③ 增加了10Mbit/s/100Mbit/s自动协商功能。

（2）100Base-T的物理层规范

100Base-TX网络是使用5类UTP的快速以太网，100Base-TX网络与10Base-T网络有许多相似之处。它们都使用非屏蔽双绞线的两对线芯，一对用于发送，另一对用于接收，但100Base-TX网络的其他两对线芯不能作为它用，以避免其他信号共享电缆引起的干扰。100Base-TX网络与10Base-T网络最大网段长度均为100m。

10Base-T网络使用曼彻斯特编码方式，而100Base-TX网络采用4B/5B编码方式。

2. 100Base-T4

100Base-T4 标准是快速以太网的 4 种有关传输介质的标准之一。另外 3 种标准是 100Base-TX、100Base-FX 和 100Base-T2，而且这 3 种标准支持全双工模式。

100Base-T4 使用 4 对 3 类 UTP 作为传输介质，最大传送距离为 100m。4 对 UTP 中的其中 3 对线用以传输数据（每对线的数据传输速率为 33.3Mbit/s），另 1 对线进行冲突检验和控制信号的发送接收。100Base-T4 不使用曼彻斯特编码，信号采用 8B/6T 的编码方式，即每 8 位作为一组的数据转换为每 6 位一组的三元码组，每条输出信道的信息传输速率为（33.3Mbit/s）×6/8 = 25Mbit/s。

100Base-T4 标准中，一条双绞线中的 4 对线缆都要使用，而在 100Base-TX 和 100Base-T2 标准中只要求使用两对线。4 对双绞线中，2 对单向，2 对双向，是每个传输方向有 3 对线能同时传输数据。

100Base-T4 网络中线缆的连接关系是：1、2 端子用于发送，3、6 端子用于接收，4、5，7、8 是双向线。1、2 线对，3、6 线对，4、5 线对和 7、8 线对双绞必须是绞纽的双绞线。100Base-T4 快速以太网，则要用到 4 对线，即 8 根针脚都要用到。

网络线缆的 8 针按照 T568A 和 T568B 标准的排序关系如图 8-2 所示。

水晶头与网卡的连接关系如图 8-3 所示。

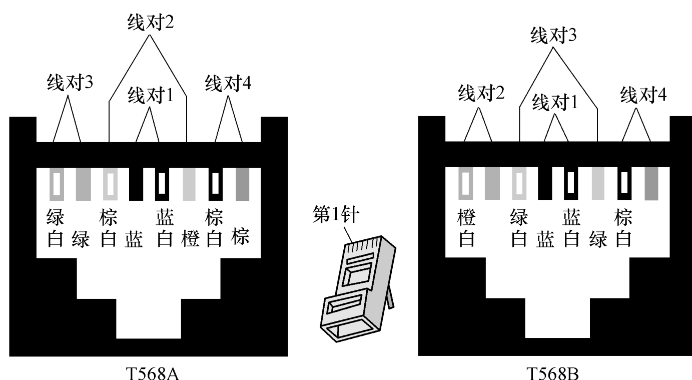


图 8-2　网络线缆的 8 针按照 T568A 和 T568B 标准的排序关系

在 100Base-T4 网络中，设计目的之一是：尽量兼容 10Mbit/s 的网络，避免重新布线，使用 25MHz 的信号（IEEE 802.3 使用 20MHz 的信号），不使用曼彻斯特编码，线路信号码型为 8B/6T 编码方式。

3. 100Base-TX 标准

在 IEEE 802.3u 快速以太网中，使用最为普遍的是 100Base-TX 标准。100Base-TX 标准使用的是两对阻抗为 100Ω 的 5 类 UTP，其中一对用于发送数据，另一对用于接收数据。

100Base-TX 采用的物理拓扑结构为星形，在目前的组网方法中，使用最多的是 100Base-TX标准方式。

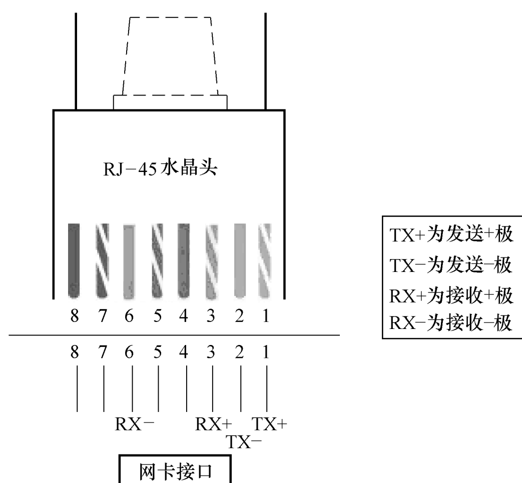


图 8-3　水晶头与网卡的连接关系

100Base-TX 网络采用 IEEE 802.3u 标准，

它制定了在5类UTP或STP上速率达100Mbit/s的快速以太网信令标准。

作为IEEE 802.3以太网标准的扩充，快速以太网的技术特征如下：

1）数据传输速率为100Mbit/s；

2）广播方式通信；

3）特定的媒体访问控制（MAC）方案；

4）网络中网段的最大传输距离为100m。

100Base-TX采用的线路信号码型为4B/5B编码方式，即把每4位数据用5位的编码组来表示。

100Base-TX是全双工系统。

100Base-TX标准支持10Mbit/s/100Mbit/s自动协商。IEEE自动协商模式可以使交换机或网络接口卡自动把点对点连接的端口速率协商到最高的公共水平，使线路两端具有最快速度的组态。集线器、交换机和网络接口卡都需要包含自动协商逻辑（一般在1996年以后发布的所有的快速以太网设备都会有自动协商逻辑）。

4. 100Base-FX

100Base-FX是在光纤上实现的100Mbit/s以太网标准，其中F指光纤，采用IEEE 802.3u标准。100Base-FX运行于光纤上，因此适合作骨干网和长距离传输的网络。使用IEEE 802.3u标准的100Base-TX、100Base-T4网络，还有10Base-T网络都可以通过使用桥接器、路由器接入到由100Base-FX构成的光纤骨干网中。同100Base-TX一样，100Base-FX线路信号码型为4B/5B编码方式。

100Base-FX使用两根光纤，其中一根用于发送数据，另一根则用于接收数据。使用多模光纤工作在半双工和全双工模式下，支持的光纤距离分别是412m和2km；使用单模光纤工作在全双工模式下，支持的光纤距离为15～20km。

一个混合使用100Base-FX、100Base-TX、10Base-T的网络系统如图8-4所示。

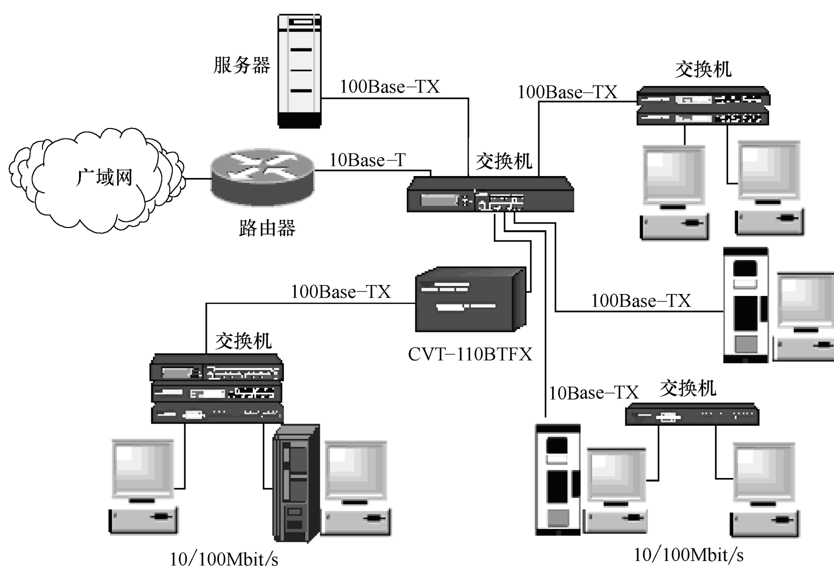


图8-4 混合使用100Base-FX、100Base-TX、10Base-T的网络系统

5. 100Base-T2

100Base-T2网络的数据传输速率为100Mbit/s，采用星形拓扑结构，传输介质是2对100Ω的

3 类双绞电缆，工作站与交换机之间的最大距离为 100m，线路信号码型是 PAM5 ×5 编码方式。

8.2.4　千兆位以太网

1. 千兆位以太网的结构体系

随着多媒体技术、网络分布计算、大量视频文件的应用和大带宽业务的需求，用户对局域网的带宽提出了更高的要求。同时，100Mbit/s 快速以太网也要求主干网、服务器一级有更高的带宽。另外，由于以太网的简单、易用、廉价及应用的广泛性，千兆位以太网技术就是在这种需求背景下发展起来的。1996 年 3 月成立的 IEEE 802.3z 工作组，专门负责千兆位以太网的研究，并制定相应标准。

千兆位（1000Mbit/s）以太网技术是一种主流应用的以太网技术，1000Mbit/s 以太网也叫吉位以太网。最初制定的千兆位（1000Mbit/s）以太网标准 IEEE 802.3z 包括了 3 种结构体系的千兆位以太网：1000Base-LX、1000Base-SX 和 1000Base-CX，IEEE 802.3ab 标准规定了 1000Base-T 的网络结构体系。其中 1000Base-LX、1000Base-SX 是基于光纤应用的，1000Base-CX 和 1000Base-T 是基于双绞线应用的。

千兆位以太网的结构体系如图 8-5 所示。

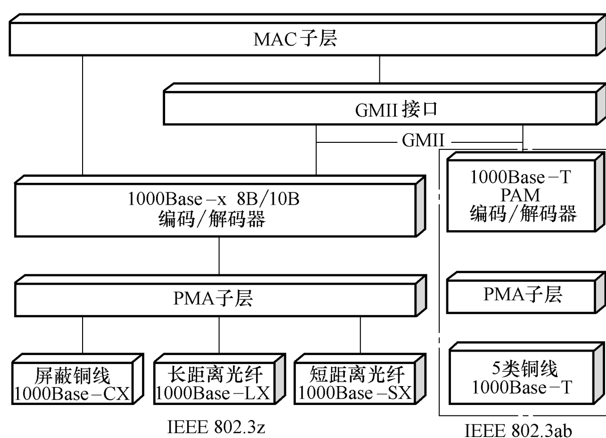


图 8-5　千兆位以太网的结构体系

2. 1000Base-LX

1000Base-LX 是遵从 IEEE 802.3z 标准的一种基于光纤应用的千兆位以太网规范。1000Base-LX 可以采用单模或者多模光纤作为传输介质组成网络，LX 代表长波，网络工作使用长波激光（1310nm）。1000Base-LX 所使用的光纤主要有：芯径为 62.5μm、50μm 的多模光纤和芯径为 9μm 的单模光纤。使用多模光纤的最大传输距离为 550m，使用单模光纤的最大传输距离为 5000m。

1000Base-LX 采用 8B/10B 编码方式，使用星形拓扑结构组网，主要适用于校园或城域主干网。

网段的长度、使用的激光载波波长、使用的传输介质和全双工/半双工的具体对应关系有：

1）使用 1310nm 长波长激光器，62.5μm 的多模光纤，工作在半双工模式下，最大网段长度为 316m；工作在全双工模式下，最大网段长度为 550m。

2）使用 1310nm 长波长激光器，50μm 的多模光纤，工作在半双工模式下，最大网段长度为 316m；工作在全双工模式下，最大网段长度为 550m。

3）使用 1310nm 长波长激光器，9μm 的单模光纤，工作在半双工模式下，最大网段长度为

316m；工作在全双工模式下，最大网段长度为 5000m。

3. 1000Base-SX

1000Base-SX 也是遵从 IEEE 802.3z 标准的一种基于光纤应用的千兆位以太网规范。SX 代表短波长，使用 850nm 波长的短波长激光器，使用芯径为 62.5μm、50μm 的多模光纤。1000Base-SX 网络线路信号码型为 8B/10B 编码，组网的拓扑结构采用星形，适用于作为楼宇内网络系统的主干网络。具体的有：

1）使用 850nm 波长的短波长激光器，采用 62.5μm 的多模光纤，在使用半双工模式下，最大网络长度为 275m；使用全双工模式下，最大网络长度也为 275m。

2）使用 850nm 波长的短波长激光器，采用 50μm 的多模光纤，在使用半双工模式下，最大网段长度为 5505m；使用全双工模式下，最大网段长度也为 550m。

4. 1000Base-CX

1000Base-CX 采用 150Ω 平衡屏蔽双绞线（STP）作为传输介质（连接器为 DB-9），遵从 IEEE 802.3z 标准，组网拓扑结构为星形，最大传输距离为 25m，网络线路信号码型为 8B/10B 编码，适用于数据中心设备间（如交换机之间的连接，尤其适用于主干交换机和主服务器之间的短距离连接）或者堆叠设备间的短距离互连，但不适用于数据中心与配线架的连接。

1000Base-CX 工作在半双工模式下，最大传输距离为 25m；工作在全双工模式下，最大传输距离为 50m。

5. 1000Base-T 标准

（1）1000Base-T 网络

1000Base-T 网络遵从 IEEE 802.3ab 标准，1000Base-T 是一种可以采用 5 类、超 5 类、6 类或者 7 类 UTP 的全部 4 对芯线作为传输介质的千兆位以太网规范，在全部的 4 对双绞芯线中，每对都可以同时进行数据收发，网段的最大覆盖距离为 100m，传输速率为 1Gbit/s，组网拓扑结构为星形，线路信号码型为 PAM5 ×5 编码方式。1000Base-T 采用 4 对 5 类双绞线完成 1000Mbit/s 的数据传送，每一对双绞线传送 250Mbit/s 的数据流。

1000Base-T 与 10Base-T、100Base-T 完全兼容，它们都使用 5 类 UTP，从交换机到终端站点的最大距离都为 100m。

数据中心的服务器与服务器、交换机之间的互联，采用 1000Base-T 技术，是一种经济的、简单高效的组网方式。高性能桌面台式机工作站安装千兆位以太网卡，可直接与千兆位以太网相连。

（2）1000Base-T 网络的应用

1）在三层级网络中的应用：千兆位以太网多用于楼宇计算机网络的主干网，但也常常用于对带宽要求较高的桌面环境中。图 8-6 给出了一个将千兆位以太网用于楼宇计算机网络的主干网络，将 100Mbit/s 以太网或 10Mbit/s 以太网用于桌面环境的情况。

其中，接入层级由 10Mbit/s 以太网交换机加上 100Mbit/s 上行链路组成；汇聚层由100Mbit/s 以太网交换机加 1000Mbit/s 上行链路组成；主干网络层级由千兆位以太网交换机组成。

2）用于 BAS：在使用通透以太网的 BAS 中，以太网多用 100Mbit/s 的快速以太网，但在系统的监控节点数量较大时，完全可以使用千兆位以太网，使用 1000Base-T 规范，可以使用 5 类、超 5 类、6 类甚至 7 类双绞线作为传输介质，使用星形拓扑结构组网，速度快、结构简单和效率高，但覆盖范围小。采用千兆位以太网的 1000Base-SX/1000Base-LX 规范，采用光纤作为传输介质，BAS 的覆盖范围较大。但最佳的情况是采用工业以太网作为 BAS 的通信网络架构，才能适应各种较为复杂的强干扰电磁环境的楼宇应用。

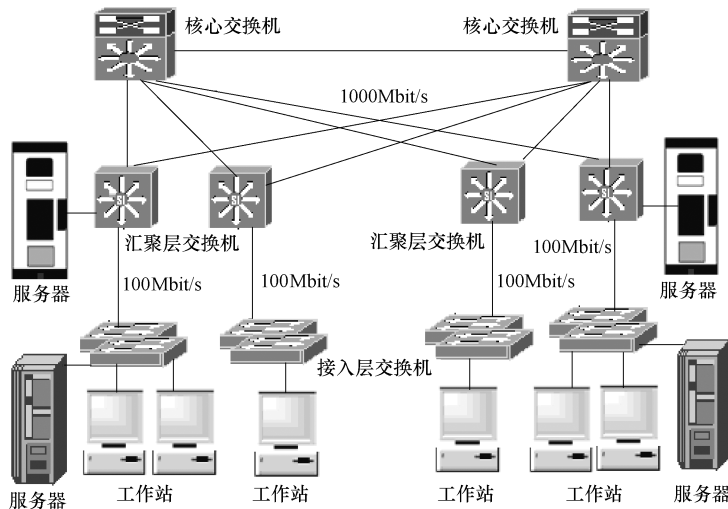


图 8-6　千兆位以太网组网应用举例

6. 千兆位以太网的技术特点

千兆位以太网有鲜明的技术特征，主要包括以下 11 点：

（1）专用的带宽

随着局域网接入设备的计算能力与通信能力的提高，能够充分利用高速局域网性能的应用也迅速发展，出现了以专用带宽方式使用局域网的趋势，特别是在服务器和高性能工作站方面尤为明显。千兆位以太网虽然支持以传统共享带宽方式使用信道，但只有当千兆位以太网以交换机或路由器为中心部署成专用带宽系统时，才能够达到最佳的性能和最大的带宽。

（2）使用全双工以太网连接

千兆位以太网中通信通道不再被多个设备共享时，也就不需要传统的 CSMA/CD 媒体访问控制机制了。这样站与站之间、站与集线器之间以全双工方式（同时发送和接收）工作，既增加了信道容量，又使网络范围突破了 CSMA/CD 控制系统的限制。千兆位以太网的基本结构形式是采用全双工、专用的链路，这使得链路长度足以支持建筑物内部和园区主干网的应用。

（3）以太网流量控制

在专用信道与全双工操作的概念基础上，人们进一步提出一种允许设备显式地控制全双工链路中数据流的方法。该方法在千兆位以太网之前已经产生，是全双工以太网标准的一部分，它使交换机和其他使用全双工链路的设备可以防止由于缓冲区溢出而造成的不必要的帧丢失，在此基础上，又产生了需要较少缓冲区的低价位产品。使用显式流量控制方法可制造出性价比更好的千兆位以太网产品。

（4）媒体无关的接口

以太网的发展历史表明，它需要支持不同类型的底层物理介质。由于没有哪一种媒体是“最好的”，在特定的应用环境，任何一种介质都可能是最适用的，因此以太网一般提供某些与媒体无关的接口，千兆位以太网也并不例外地支持 100Mbit/s 接口的增强版本。

（5）自动连接配置

由于设备的性能差别越来越大，因此需要保证相互连接设备的正确配置。如果没有某些自动方式来确定和配置设备的功能，那么系统管理人员的负担会变得很沉重。为解决这个问题，最早在开发双绞线 100Mbit/s 以太网时就出现了自动协商系统，千兆位以太网引入了这种自动协商系统，并把它扩展到支持 1000Mbit/s 以太网的铜电缆和光纤。

（6）简易性

千兆位以太网保持了经典以太网的技术原理，安装实施和管理维护的简易性是千兆位以太网成功的基础之一。

（7）技术过渡的平滑性

千兆位以太网保持了经典以太网的主要技术特征，采用相同的帧格式及帧的大小，支持全双工、半双工工作方式，可以确保和百兆位以太网的平滑过渡。

（8）网络可靠性

千兆位以太网保持经典以太网的安装、维护方法，采用中央集线器和交换机的星形拓扑结构和结构化布线方法，可以确保千兆位以太网的可靠性和稳定性。

（9）可管理性和可维护性

千兆位以太网采用简易网络管理协议（SNMP），即经典以太网的故障查找和排除工具，可以确保千兆位以太网在可管理性和可维护性上简便可行。

（10）网络成本低

千兆位以太网的网络成本包括设备成本、通信成本、管理成本、维护成本及故障排除成本，由于继承了经典以太网的技术，使千兆位以太网的整体成本相对下降。

（11）支持新应用和新数据类型

伴随着计算机技术的应用和发展，出现了许多新的应用模式，也对网络提出了更高的要求，因此千兆位以太网具备了支持新应用与新数据类型的能力。

8.3 从标准以太网、快速以太网到千兆位以太网的升级

当使用标准以太网、快速以太网的用户遇到以下一些情况时，可以考虑将 10Mbit/s、100Mbit/s 的以太网升级到千兆位以太网。

8.3.1 网络环境需要更高的带宽

在园区和建筑中的计算机网络使用标准以太网、快速以太网的环境中，如果用户的业务需求在使用 10Mbit/s、100Mbit/s 的网络已经不能提供满意的网络环境时，就要考虑进行从标准以太网、快速以太网到千兆位以太网的升级。

用户要求路由器、交换机、集线器、中继器和服务器等关键设备之间有更高带宽的通信时，如交换机到路由器、交换机到交换机、交换机到服务器和中继器到交换机连接；在用户有更高带宽的桌面应用情况下，要进行平滑升级。

8.3.2 交换机到交换机连接信道的升级

一个直接的升级方案是将快速以太网交换机之间或中继器之间的 100Mbit/s 的链路升级到 1000Mbit/s。通过升级，交换机到交换机的链路可以使 100Mbit/s/1000Mbit/s 交换机支持更多数量的交换式或共享式的快速以太网网段。

8.3.3 交换机到服务器连接信道的升级

为使网络中的工作站获得从应用服务器到文件服务器的高速访问能力，进行交换机到服务器连接信道的升级。

较简捷的升级方案是将快速以太网交换机升级为千兆位以太网交换机，以获得从具备千兆位以太网网卡的高性能超级服务器集群到网络的高速互联能力，同时网络线缆性能要达到千兆位以

太网的水平。

8.3.4　对交换式快速主干以太网的升级

对交换式快速主干以太网进行升级可以通过用千兆位以太网交换机或中继器汇接快速以太网交换机来实现；将快速以太网主干交换机升级为千兆位以太网交换机，支持多台 100Mbit/s/1000Mbit/s 交换机，以及其他的设备（如路由器）。当主干网中的交换机升级为千兆位以太网交换机时，高性能的服务器可以通过千兆位以太网接口卡直接连接到主干网中，大幅度提高用户对服务器的访问吞吐能力。主干网升级到 1000Mbit/s 后，可以支持更多数量的网段，为每个网段提供更高带宽，使各网段支持更多的节点接入能力。

8.3.5　网络升级的一些注意事项

1. 网络升级按照相关的技术规范进行

将主干网络交换机升级至千兆位以太网交换机，提高通过网络主干流动的数据流量，加快网络速度。将标准以太网、快速以太网升级到千兆位以太网时，应该按照相关的技术规范进行，不能简单地通过加入千兆位以太网设备或替换原以太网设备，就实现了向千兆位以太网的升级。

2. 选好网卡

将服务器和桌面工作站的传输速率提高至千兆位时，要特别注意挑选千兆位以太网网卡。千兆位以太网需要千兆位以太网网卡，注意应该优先选购 64 位 PCI 千兆位以太网网卡。

3. 综合布线系统的配合

在向千兆位以太网升级时，综合布线系统的配合是至关重要的。千兆位以太网指的是网络主干的带宽，因此网络主干布线系统一定要满足千兆位以太网的要求。在原有的网络使用光纤（含多模光纤、单模光纤）时，向千兆位以太网升级可以不用再更换综合布线系统的主干线路了。网络覆盖距离小于 550m 的情况下，升级时只要敷设价格相对低廉得多模光纤就可以满足网络升级的布线系统需求了。

4. 网络主干连接的网络分支配合升级

网络主干升级了，网络的分支也应随之升级。如果原有的工作站已经安装了 10Mbit/s/100Mbit/s 自适应网卡，只要将网卡接到百兆位交换机上就可以了；如果原有的工作站使用的是 10Mbit/s 网卡，则需要将网卡更换为 10Mbit/s/100Mbit/s 自适应网卡。

8.3.6　从标准和快速以太网向千兆位以太网升级的举例

1000Base-T 标准可以运行在 5 类、超 5 类双绞线上，也可以在 6 类线和 7 类线系统上运行。楼宇中最初的骨干网络是快速以太网，使用的交换机为几台服务器提供 10Mbit/s/100Mbit/s 连接。用户桌面工作环境是 10Mbit/s/100Mbit/s 交换式连接的情况。

从快速以太网向千兆位以太网升级的步骤如下：

1）将骨干网络升级为 100Mbit/s/1000Mbit/s 快速以太网/千兆位以太网。

2）升级工作组交换机。在重要的服务器上采用 100Mbit/s/1000Mbit/s 快速以太网/千兆位以太网网卡。

3）将网络中对带宽要求较高的高端用户的工作站网卡升级到 100Mbit/s/1000Mbit/s 快速以太网/千兆位以太网网卡。

升级后的网络如图 8-7 所示。在千兆位以太网交换机上挂接了工作在千兆位网络环境中的服务器。部分高端用户的计算机直接工作在千兆位网络环境中，大多数客户计算机都工作在 10Mbit/s/100Mbit/s 的网络环境中。

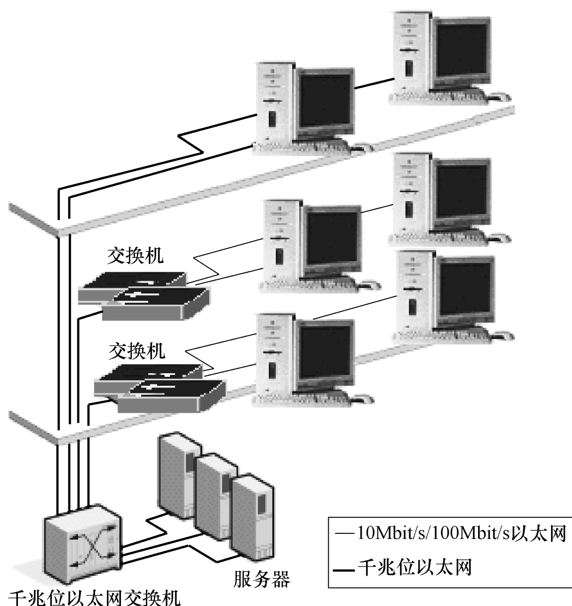


图 8-7　升级后的网络

8.4　以太网与楼宇自控网络

8.4.1　以太网进入工控和楼宇自控领域

楼宇自控领域是工控领域在建筑平台中的延伸，工控领域中的许多规律性内容完全可以应用于楼宇自控领域，但 BAS 在应用环境、具体的应用中还是有着非常强的自身和行业特点。

1. 以太网的主要优点

以太网在各个领域和行业有着非常广泛和深入的应用，这主要源于以太网的高度灵活性和较易实现的特点。

以太网的主要优势如下：

（1）组网结构简单和实现成本低廉

与 PDH 网络、SDH 网络、SONET 网络、ATM 网络和 FR 网络相比，以太网的组网结构简单得多，实现成本低廉得多。

这里的 PDH 网络是“准同步数字系列”（Plesiochronous Digital Hierarchy，PDH）网络；SDH 网络是“同步数字系列”（Synchronous Digital Hierarchy，SDH）的网络；SONET 是同步光纤网络（Synchronous Optical Network，SONET）；ATM 网络是“异步传输模式”（Asynchronous Transfer Mode，ATM）网络，它将传输数据切分为固定长度（53B）的信元传送，可根据业务类型对带宽的需要动态分配信元，执行异步信元交换，从而容纳不同的业务类型；FR 是帧中继（Frame Relay FR）网络即采用分组技术的数据传输网络。

（2）技术升级中兼容性优良

从 10Mbit/s 的 IEEE 802.3i 以太网标准到后来的万兆位 IEEE 802.3ae 规范标准，在技术的升级中，以太网的技术升级体现了很优良的兼容性能。10Mbit/s、100Mbit/s 和 1Gbit/s 甚至 10Gbit/s各种速率可以采用“自动协商”，升级的成本非常低廉，实现方式简捷，这是其他网络技术不能比拟的。

（3）组织网络灵活

以太网可通过支持软件，利用“自动协商”功能实现半双工、全双工工作模式的转换；以太网可以方便地组成满足对带宽要求不同的用户需求，组成多种速率等级的局域网。如：10Mbit/s、100Mbit/s、1Gbit/s 或 10Gbit/s 的网络。以太网使用的传输介质覆盖双绞线、同轴电缆、多模光缆与单模光缆。

使用以太网技术可以方便地组建各种规模的虚拟网、专用网。

以太网组网使用的物理拓扑结构和逻辑拓扑结构非常灵活，可以方便地变更，网络扩展和网络调整也很方便。

（4）与接入网和干线网络之间的网络亲和性好

对于用户来讲，可以使用的宽带接入方式较多，如数字用户线（xDSL）网络技术、光纤/同轴电缆混合（HFC）网络技术、以太网宽带接入、电力线通信（PLC）宽带接入、无线宽带接入、ATM 技术、PDH 技术、光纤接入网技术等。要使楼宇内局域网通过宽带接入网接入 Internet，以太网更具有优势。主干网如果也采用以太网，那么局域网与接入网、干线网络之间的互联互通接入变得更简单了。

（5）以太网技术的较大范围应用可使各种异构网络更易于互联互通

目前架构城域网和广域网的网络技术种类较多，且较为复杂，组成的网络彼此异构，实现局域网、城域网和广域网之间的无缝互联互通有很大的障碍，数据在异构网络之间的接力传输情况较为复杂，异构网络不仅包括有线的不同制式网络，而且还包括多种无线网络的加入。采用以太网技术的局域网、广域网更易于实现彼此之间和各种异构网络的无缝互联互通。

2. 以太网作为楼宇自控网络的优势

商业领域和办公自动化中使用的以太网技术特点主要适合信息管理、信息处理，作为办公网、商务网已经非常成熟了。近年来在信息域取得了巨大成功的以太网的应用早已拓展进了工控领域，并且又进一步渗透到楼宇自控领域。

以太网进入工控领域有这样的背景：自动化控制技术从单机控制向工厂自动化、系统自动化控制方向发展。制造业对自动化技术提出了数字化通信及信息集成的技术要求，要求应用数字通信技术实现工厂信息纵向透明通信。

经过多年努力，自动化行业一直期待和努力统一现场总线的技术标准，但都没有成功，自动化行业实际上处于一个多种总线技术标准并存的现实应用环境中。在工控领域，使用一种现场总线技术不可能满足所有行业的技术要求。IEC 61158 制定统一的现场总线技术标准努力的失败和现场总线标准之争，使得在 IT 行业已经获得成功的以太网技术开始进入工控领域。

目前，以太网已成功应用于工控领域的诸多方面，将以太网技术引入工业过程控制底层，即设备层或现场层，成为甚至取代现有现场总线技术成为统一的工业网络标准，就成为了一种发展趋势。

作为楼宇自控网络，以太网具有很多优点：

1）以太网是全开放、全数字化的网络，如果将以太网应用在控制域，接入控制网络不同厂商的设备可以很容易实现互联互通。

2）以太网能实现工业控制网络与企业信息网络的无缝连接，形成企业级管控一体化的全开放网络，如图 8-8 所示。

图 8-8 给出了传统工业控制网络和工业以太网控制网络在组成系统方面的区别。对于传统工业控制网络来讲，企业级网络使用以太网，但工厂级网络、过程级网络一般可由多种控制总线承担，现场级控制网络一般多为现场总线；不同的控制总线之间需要用网关来实现连接，如果一个传统的工业控制网络中包含多个不同的控制总线，就需要使用多种不同的网关来组织系统，这样

一来控制系统的通信网络架构就非常复杂，对于控制系统整体来讲过于复杂。

对于使用工业以太网作为控制网络情况就简化得多。在图 8-8 中，从企业级、工厂级、过程级和现场控制网络使用工业以太网，不再需要复杂的网关，控制系统的通信网络架构大为简约化，可以大幅度地提高控制系统工作的可靠性、降低系统的建设成本，尤其这类结构的控制系统可以极为便利地接入 Internet，远程监控性能大幅提高。

3）软硬件成本低廉。由于以太网技术已经非常成熟，支持以太网的软硬件受到厂商的高度重视和广泛支持，有大量的应用软件和硬件设备可供用户选择。

4）通信速率高。随着企业信息系统规模的扩大和复杂程度的提高，对信息量的需求也越来越大，有时甚至需要音频、视频数据的传输，目前标准以太网的通信速率为 10Mbit/s，100Mbit/s 的快速以太网已广泛应用，千兆位以太网技术也逐渐成熟，10Gbit/s 的以太网也正在研究，其速率比目前的现场总线快很多。

5）可持续发展潜力大。在这信息瞬息万变的时代，企业的生存与发展在很大程度上取决于一个快速而有效的通信管理网络。随着信息技术与通信技术的发展更加迅速，也更加成熟，保证了以太网技术不断地持续向前发展。

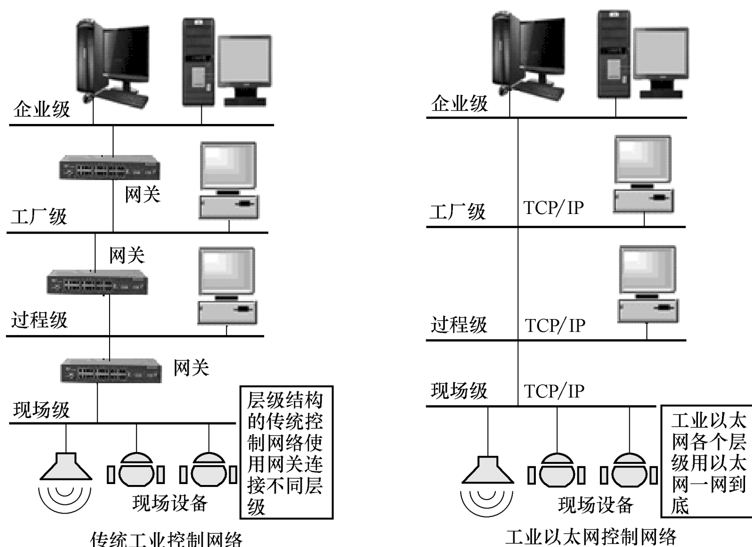


图 8-8　传统工业控制网络和工业以太网控制网络

3. 以太网在工控和楼宇自控领域中应用遇到的一些问题

以太网进入工业控制领域和楼宇自控领域，也存在一些问题。

（1）影响应用的一些因素

以太网进入工业控制领域和楼宇自控领域，也存在一些问题。

1）实时性问题：以太网采用 CSMA/CD 的媒体访问控制方式，其本质上是非实时的。一条总线上有多个节点平等竞争总线，等待总线空闲。这种方式很难满足工业控制领域对实时性的要求。这成为以太网技术进入工业控制领域的技术瓶颈。

2）对工业环境的适应性与可靠性问题：以太网是按办公环境设计的，需要使它的抗干扰能力、外观设计等符合工业现场的要求。

3）适用于工业自动化控制的应用层协议问题：目前，信息网络中应用层协议所定义的数据结构等特性不适合应用于工业过程控制领域现场设备之间的实时通信，因此还需定义统一的应用层规范。

4）本质安全和网络安全问题：工业以太网如果用在易燃易爆的危险工作场所，必须考虑本质安全问题。另外，工业以太网由于使用了 TCP/IP，因此可能会受到包括病毒、黑客的非法入侵与非法操作等网络安全威胁。

5）服务质量（QoS）问题：随着技术的进步，工厂控制现场底层的信号已不局限在单纯的数字量和模拟量上，还可能包括视频和音频，网络应能根据不同用户需求及不同的内容适度地保证实时性的要求。

以太网在工厂自动化管理层和车间监控层已得到广泛应用和用户认可，在设备层对实时性没有严格要求的场合也有许多应用；如果要使以太网作为工控领域普遍适用的控制域网络，需要解决上述问题。

（2）改进方法

可以采用的解决方法有：

1）采用实时性好和可靠性高的工业以太网技术。

2）传输介质应能提供多种工业级护套和铠装电缆、光纤等。

3）使用各种防护等级工业级的接插件和接口。

4）应该具有总线供电及本质安全的性能。

5）在网络负荷不重的情况下，提高网络带宽，当网络速率大幅提高后，在系统规模不大、网络节点数量也不大的情况下，测控指令的传输实时性能够满足控制领域的实时性要求。

8.4.2　实现千兆位以太网的方法和用于工业控制及工业环境中的千兆位以太网

1. 实现千兆位以太网的方法

（1）采用 3 层设计方法

实现千兆位以太网最通用的方法是采用 3 层设计。最下面的一层由 10Mbit/s 以太网交换机加 100Mbit/s 上行链路组成，第二层由 100Mbit/s 以太网交换机加千兆位以太网上行链路组成，最高层由千兆位交换机组成。

（2）使用升级的方式

下面介绍 3 种不同情况下升级到千兆位以太网的方法：

1）升级交换机到交换机的连接。这是直接的升级方案，将快速以太网交换机或中继器之间的 100Mbit/s 连接升级或 100Mbit/s/1000Mbit/s 交换机之间的 1000Mbit/s 连接，从而可支持更多的交换和共享快速以太网段。

2）升级交换机到服务器的连接：较简易的升级方案是将快速以太网交换机升级成千兆位以太网交换机，安装了千兆位以太网网卡的高性能服务器组与 1000Mbit/s 的高传输速率相连，提高对应用和文件服务的高速访问能力。

3）升级交换式快速以太网主干网络：多个 10Mbit/s/100Mbit/s 交换机构成的快速以太网主干可以升级为支持多个 100Mbit/s/1000Mbit/s 交换机及其他含有千兆位以太网接口和上连模块的路由器和集线器的千兆位以太网交换机。若需要也可安装千兆位集线器和/或缓存式分配器。

2. 用于工业控制及工业环境中的千兆位以太网

除了上述的千兆位以太网以外，还有一些在工业环境中应用较多的千兆位以太网，如 1000Base-LH、1000Base-ZX、1000Base-LX10、1000Base-BX10 和 1000Base-TX。这些规范并没有由 IEEE 正式以标准形式对外发布，但其应用是较为广泛的。

以上五种千兆位以太网有基于光纤运行的网络，也有基于双绞线运行的网络。

（1）基于光纤运行的千兆位以太网

没有被 IEEE 正式以标准形式对外发布的千兆位以太网并且在光纤上运行的网络有 1000Base-

LH、1000Base-ZX、1000Base-LX10 和 1000Base-BX10。

1）1000Base-LH：1000Base-LH 是一个非 IEEE 标准规范，是在工业中已经被广为接受的千兆位以太网规范。1000Base-LH 网络可以使用单模光纤和多模光纤，采用长波激光（1310nm）。在单模光纤上运行时，1000Base-LH 网络最大支持距离为 10km，且可以与 1000Base-LX 网络保持兼容；在多模光纤上运行时，最大支持距离为 550m。

2）1000Base-ZX：该规范也是一个非 IEEE 标准规范，同 1000Base-LH 一样，在工业中已被广为接受为事实上的千兆位以太网规范。1000Base-ZX 在单模光纤上运行，使用波长为 1550nm 的单模超长波光纤，最大传输距离可达 70km。

3）1000Base-LX10 和 1000Base-BX10：这也是两个在工业环境中应用广泛且在基于光纤运行的非标准规范。1000Base-LX10 采用的是波长为 1310nm 的单模长波光纤，最长有效传输距离可达 10km。

1000Base-BX10 网络的两根光纤所采用的传输介质类型是不同的：下行方向（从网络中心到外部）采用的是波长为 1490nm 的单模超长波光纤，上行方向则是采用 1310nm 的单模长波光纤。1000Base-BX10 网络最大有效覆盖距离为 10km。

（2）1000Base-TX

1000Base-TX 标准不是由 IEEE 制定的，而是由 TIA/EIA 于 1995 年发布的，对应的标准号为 TIA/EIA-854。

1000Base-TX 标准基于双绞线运行，使用 4 对双绞线，两对线发送数据，两对线接收数据。线路信号码型为 8B/10B 编码。1000Base-TX 网络的传输介质是 6 类或者 7 类双绞线，最大电缆长度为 100m。

3. 5 种非 IEEE 标准的千兆位以太网规范比较

5 种千兆位以太网规范的比较见表 8-2。从中可以看出，这些规范的一些基本技术参数比较。

表 8-2　5 种千兆位以太网规范比较

5 种非 IEEE 标准的千兆位以太网规范	使用的传输介质	最大有效传输距离
1000Base-LH	波长为 1310nm 的单模或者多模光纤	10km
1000Base-ZX	波长为 1550nm 的单模光纤	70km
1000Base-LX10	波长为 1310nm 的单模光纤	10km
1000Base-BX10	下行为波长为 1490nm 的单模光纤， 上行为波长为 1310nm 的单模光纤	10km
1000Base-TX	6 类或者 7 类双绞线	100m

8.5　万兆位以太网

以太网的数据传输速率从 10Mbit/s 经过 100Mbit/s 和 1Gbit/s 的千兆位以太网的发展，目前 10Gbit/s 的万兆位以太网已经开始应用在局域网的主干网上。在智能园区、包括大型校园、工业园区、开发区以及智能建筑的局域网中，100Mbit/s 和 1Gbit/s 以太网已经越来越多地进入应用。与 10Mbit/s 经过 100Mbit/s 和 1Gbit/s 的千兆位以太网不同，在万兆位以太网上，不再使用双绞线或其他铜缆。

万兆位以太网也叫 10 吉比特以太网，就是 10000Mbit/s 数据传输速率的以太网。万兆位以太网的 IEEE 标准为 IEEE 802.3ae，规范了万兆位以太网局域网（Ethernet Local Area Network，

ELAN）和万兆位以太网广域网（Ethernet Wide Area Network，EWAN）两种物理层性能，传输介质可以是多模光纤，也可以是单模光纤。万兆位以太网仅工作在全双工工作模式下。万兆位以太网最大网段长度可达40km，线路信号码型采用8B/10B 和 MB810 两种类型编码。

8.5.1　万兆位以太网的技术特点

2002年6月万兆位以太网（10gigabit Ethernet）标准 IEEE 802.3ae 出台。万兆位以太网主要特点如下：

1）MAC 子层仍使用 IEEE 802.3 帧格式，维持其最大帧长为1518B、最小帧长为64B 不变。在 MAC 子层和物理层实现10Gbit/s 传输速率。

2）不再支持半双工的 CSMA/CD 媒体访问控制方式，只定义了全双工方式，即只可能实现全双工交换型万兆位以太网。

3）万兆位以太网标准定义了两种物理层：局域网物理层和广域网物理层，它们都使用光纤作为传输介质。

4）支持星形局域网拓扑结构，采用点到点连接和结构化布线技术。

5）万兆位以太网的物理层与千兆位以太网物理层有着相似的结构，但万兆位以太网媒体无关接口（XGMII）取代了千兆位以太网媒体无关接口（GMII），XGMII 把 MAC 层与物理层相连。另外对于广域网物理层10GBase-W，增加了广域网接口子层（WIS）。

6）万兆位以太网是一种采用全双工并基于光纤运行的技术。

7）万兆位以太网技术基本承袭了以太网、快速以太网及千兆位以太网技术，用户在使用的方便性、网络互操作性方面都很便利。从100Mbit/s、1000 Mbit/s 的以太网升级到万兆位以太网的技术是简捷易行的。

8）网络数据传输速率高达10Gbit/s，传输距离远，可达40km。

9）在较大型的网络中，采用万兆位以太网连接企业网骨干路由器，可简化复杂的网络拓扑结构，提高网络性能。

10）万兆位以太网技术较大幅度地提高了网络的性能，同时提供了更多的新功能，网络安全性更好。

8.5.2　10000Base-ER 和 10000Base-EW

下面介绍 IEEE 802.3ae 标准中的两种不同的物理层规范：

1. 10000Base-ER

10000Base-ER 遵从 IEEE 802.3ae 标准，网络为星形拓扑结构；使用单模光纤（以1550nm 波长的激光作传输数据的载波）作为传输介质；支持链路长度可达40km；线路信号码型采用64B/66B编码。

2. 10000Base-EW

10000Base-EW 遵从 IEEE 802.3ae 标准，网络为星形拓扑结构；使用单模光纤（以1550nm 波长的激光作为传输数据的载波）作为传输介质；线路信号码型采用64B/66B 编码；最大网段长度为10km。

8.5.3　10000Base-LR、10000Base-L4、10000Base-SR

1. 10000Base-LR

10000Base-LR：这是 IEEE 802.3ae 标准在光纤对中传输10吉位以太网信号的 LAN 物理层标准简称。网络为星形拓扑结构；局域网物理层（LAN PHY）传输介质为单模光纤（1310nm）；线

路信号码型采用 64B/66B 编码；最大网段长度为全双工 10km。

2. 10000Base-L4

10000Base-L4：这是遵守 IEEE 802.3ae 标准在光纤对中传输 10 吉位以太网信号的物理层标准简称。网络为星形拓扑结构；传输介质为 1310nm 多模/单模光纤 4 信道 WWDM 串行接口；线路信号码型采用 8B/10B 编码方式；最大网段长度采用 62.5pm 多模光纤时为 300m/500MHz · km，采用单模光纤时为 10km。

3. 10000Base-SR

10000Base-SR：遵从 IEEE 802.3ae 标准，在光纤对中传输 10 吉位以太网信号的以太网；网络为星形拓扑结构；线路信号码型采用 64B/66B 编码。10000Base-SR 网络传输介质为多模光纤（850nm 波长）串行接口，全双工模式工作，使用多模光纤时，传输距离为 35m（62.5μm）、300m（50μm）。

8.5.4　10000Base-SW

10000Base-SW 是 IEEE 802.3ae 标准在光纤对中传输 10 吉位以太网信号的广域网物理层标准；网络为星形拓扑结构：传输介质为多模光纤（850nm 波长）；线路信号码型采用 64B/66B 编码方式；传输距离为（62.5μm 多模光纤）35m、300m；使用 50μm 多模光纤时，最大网段长度为 69m、86m、300m/0.4GHz · km。

8.5.5　万兆位以太网物理层标准和组网距离

1. 万兆位以太网物理层标准

目前定义了 3 种万兆位以太网物理层标准：10GBase-X、10GBase-R 和 10GBase-W。

（1）10GBase-X

该物理层标准与使用光纤的 1000Base-X 的物理层标准相对应，物理编码子层（PCS）中，使用与 1000Base-X 相同的 8B/10B 编码。信息传输速率为 10Gbit/s。

10Gbase-X 仅包含并行的 LAN 物理层 10Gbase-LX4 一个规范。

10Gbase-LX4 使用多模光纤和单模光纤的传输距离分别为 300m 和 10km。

（2）10GBase-R

10GBase-R 具有串行的 LAN 类型的物理层，使用 64B/66B 编码。10Gbase-R 使用串行的物理层技术，串行技术的实现比并行技术的简单，但对物理层器件的要求更高。

10GBase-R 包含 3 个规范：

1）10GBase-SR：使用 850nm 波长的激光传输，使用多模光纤。

2）10GBase-LR：使用 1310nm 激光传输，使用单模光纤，传输距离为 10km。

3）10GBase-ER：使用 1550nm 的激光传输，使用单模光纤，传输距离为 40km。

（3）10GBase-W

10GBase-W 包含 3 个规范：10GBase-SW、10GBase-LW 和 10GBase-EW。

1）10Gbase-SW：使用 850nm 激光传输，使用多模光纤，传输距离为几十米。

2）10Gbase-LW：使用 1310nm 激光传输，使用单模光纤，传输距离为 10km。

3）10Gbase-EW：使用 1550nm 激光传输，使用单模光纤，传输距离为 40km。

2. 万兆位以太网组网距离

万兆位以太网物理层支持多种光纤类型，IEEE 802.3ae 任务组已选定的物理介质关联层接口、组网光纤类型、组网距离见表 8-3。

表 8-3　万兆位以太网接口、光纤类型和组网距离

物理介质/nm	光纤类型	直径/μm	带宽/MHz	最小组网距离
850	多模	50/125	400	65m
1310	多模	62.5/125	160	300m
1310	单模	9.0		10km
1310	单模	9.0		10km
1550	单模	9.0		40km

8.5.6　万兆位以太网的应用

1. 万兆位以太网应用于局域网

万兆位以太网用作局域网，通常是组成骨干网。作为数据中心，使用万兆位以太网实现主干交换机连接各个主服务器，并由主干交换机连接下一层的交换机。也可以在办公楼群之间提供高速互连。

2. 万兆位以太网应用于城域网

万兆位以太网可用作城域网的主干网。选用合适的万兆位以太网物理介质关联层接口和单模光纤，可使连接距离达到 40km 以上。

8.6　以太网信号帧结构

在以太网中，进行通信的节点使用被称为帧的数据块进行通信，以太网协议规定了构造帧的一组规则，对于帧的最大和最小长度有明确规定，而且帧中包含目标地址和源地址的信息。以太网信号帧结构，是以太网中传输的数据单元。以太网中传输的帧分为数据帧（Data Frame）与管理帧（Management Frame）。

在 IEEE 802.3、ISO/IEC 8802-3 系列标准规范中，数据帧又分为基本帧、虚拟局域网中的扩展帧、千兆位以太网 IEEE 802.3z 标准规范的扩充帧、突发帧以及 IEEE 802.3 帧等。管理帧从事管理的站点和被管理站点之间的数据通信，管理帧的功能是实现控制与配置。

以太网站点之间进行数据传递的载体就是数据帧。数据帧包括基本帧（Base Frame）结构、虚拟网采用的一种扩展帧结构、吉位以太网的数据帧、万兆位以太网的数据帧、突发帧序列和 IEEE 802.3 数据帧等。

1. 以太网信号的基本帧结构

以太网信号的基本帧结构如图 8-9 所示。

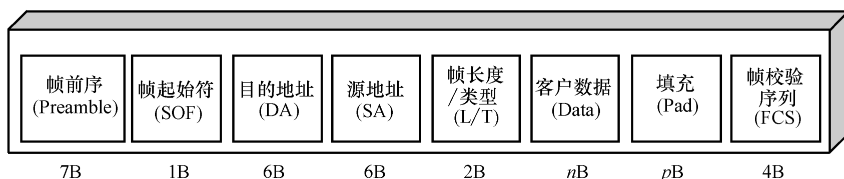


图 8-9　以太网信号的基本帧结构

1）帧前序（Preamble）：功能是用于站点间数据传输过程的同步，本身的数据量为 7B。

2）帧起始符（SOF）：SOF = 10101011 序列，表示一个基本帧的开始，1B。

3）目的地址（DA）：目的站点的 MAC 地址，6B。

4）源地址（SA）：发起通信站点的 MAC 地址，6B。

5）帧长度/类型（L/T）：表示 MAC 帧内的数据字段长度，2B。

6）客户数据（Data）：46～1500B。该区段的数据量最少为 46B。

7）填充（Pad）：该功能段的作用是确保整个帧的长度最小不能小于 64B。

8）帧校验序列（FCS）：功能是校验本帧是否出错，占用 4B。

必须满足关系：MAC 客户数据区的数据量最低不能小于 46B，最高不能超过 1500B；网络 MAC 帧的最小长度是 64B；最长不能超过 1518B。

2. 虚拟局域网中的扩展帧

遵守的规范标准为 IEEE 802.33ac 并在以太网上运行的虚拟局域网（Virtual Local Area Network，VLAN）采用的数据帧是扩展帧。扩展帧的结构如图 8-10 所示。

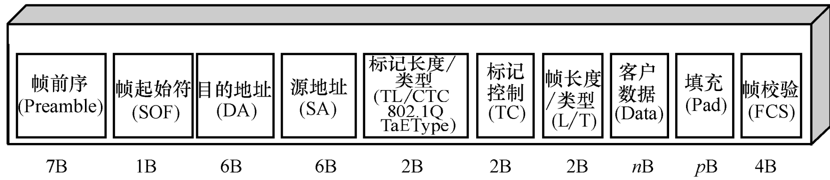


图 8-10 虚拟局域网扩展帧的结构

IEEE 802.33ac 使用立刻“TAG”虚拟局域网标记子块插入到以太网帧结构中。“TAG”标记子块有 4B，前两个字节由“802.1Q 标记类型”组成，标记序列是 0X8100 值。“TAG”标记子块的后两个字节是标记控制，16 位的分配情况是：

1）前 3 位：用户优先权标识区。

2）中间 12 位：VLAN 帧标识符。

3）最后 1 位：帧格式符合规范的标识符。

在 IEEE 802.3ac 虚拟局域网的扩展帧中，帧长度是（1518B＋4B）＝1522B。

3. 吉位以太网帧结构

IEEE 802.3z 标准定义的吉位以太网帧结构如图 8-11 所示。

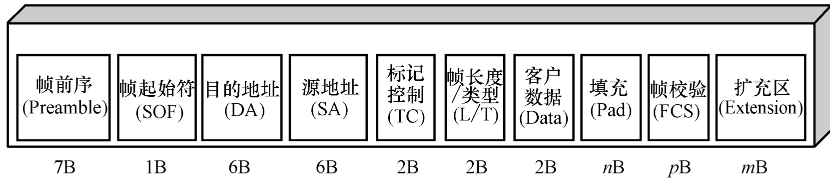


图 8-11 吉位以太网帧结构

千兆位以太网帧结构是在原 IEEE 802.3 标准规范的以太网数据基本帧结构的最后部分增加一个扩充区域，目的是使千兆位以太网帧长不少于 512B，以保证网段上发生的碰撞可传播到网上各个节点。

4. 突发帧序列

在 IEEE 802.3z 标准定义的网络环境中，允许网络中的通信站点有选择性地发送一个突发帧脉冲。突发帧序列的使用可以提高网络中数据传递信道的利用效率。突发帧序列仅用于工作在半双工模式下的千兆位以太网或更高速率的以太网中。突发帧的结构如图 8-12 所示。

5. IEEE 802.3 帧结构

IEEE 802.3 一般帧格式如图 8-13 所示。

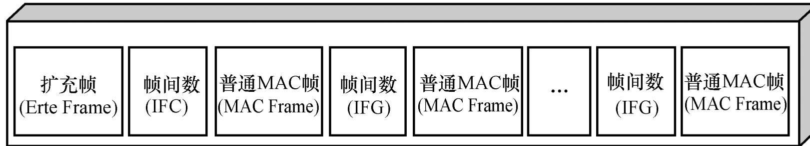


图 8-12　突发帧的结构

前序字段指示帧的开始主要用于数据通信中的帧同步，前序字段与帧起始定界符一起能保证各帧之间用于错误检测。

IEEE 802. 3 的 2B 长度字段定义了数据字段包含的字节数。数据字段的最小长度必须为 46B，以保证帧长度至少为 64B，数据字段的最大长度为 1500B。

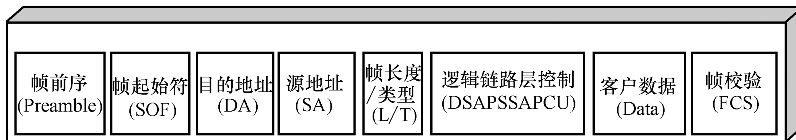


图 8-13　IEEE 802. 3 一般帧格式

6. 10Gbit/s 以太网帧结构

在以太网的数据链路层，从上层来的 IP 数据报被封装成了数据帧，到了物理层，通过对数据帧信息的编、译码来实现帧信号的收/发过程。

10Gbit/s 以太网的帧信号载入 SDH STM 一 64 帧结构的净载荷区域，会造成帧误同步，因此对 10Gbit/s 以太网帧结构进行了改进。在 10Gbit/s 以太网的帧结构中，帧前序（Preamble）和帧起始符（SOF）到达长度为 10B，增加了帧长（H）和帧头校验（HEC）两个区域。

10Gbit/s 以太网帧结构如图 8-14 所示。

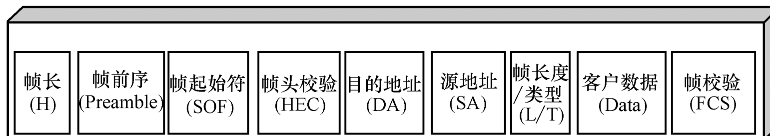


图 8-14　10Gbit/s 以太网帧结构

7. 管理帧

管理帧主要用来进行网络节点间的信息流量的控制和具有网络实体节点间通信的部分管理功能。以太网管理帧帧长通常仅为 8B，其结构如图 8-15 所示。

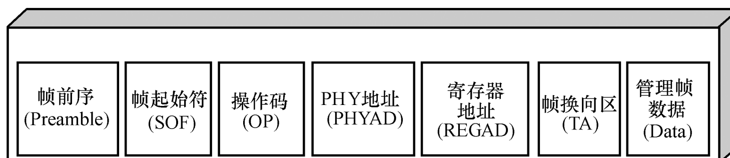


图 8-15　以太网管理帧结构

管理帧各字段说明如下：

1）管理帧前序（Preamble）：该字段占用 4B，主要用于连续监视管理接口，保证管理接口具备接收管理数据进行准备的时间。

2）管理帧起始符（SOF）：该字段占用 2 位，标志管理帧的开始。

3）管理帧操作码（OP）：该字段占用 2 位，操作码（OP）有两种正确操作码工作模式：一个是用于读管理寄存器操作码（10b），而另一个是用于写管理寄存器操作码（01b）。

4）管理帧 PHY 地址（Physical Layer Device Address，PHYAD）：该字段占用 5 位，PHY 接口接收并处理发送的管理帧，将 PHYAD 值存入站点的管理寄存器。接收的操作码（OP）响应所有与内部存储的 PHYAD 相匹配的管理帧 PHY 地址。

5）管理帧寄存器地址（Register Address，REGAD）：该字段占用 5 位，该字段的功能能识别在处理过程中涉及 32 种管理寄存器。这正与可能的 32 个 PHY 接口相匹配。

6）帧换向区（Tumaround Field TA）：该字段占用 2 位，设置目的是防止当管理帧操作码（OP）为读管理寄存器模式（10）时，PHY 器件与站管理实体（STA）之间发生竞争，即防止 PHY 与 STA 同时都向对方发送信息，从而发生碰撞（冲突）。

7）管理帧数据（Data）：该字段占用 2B，用于放置管理帧寄存器与站管理实体（STA）之间要交换的数据。

8. 暂停帧

以太网工作在全双工通信模式时，使用暂停帧（Pause Frame）来对数据流量进行控制。在进行通信的站点间，如果其中一个站点的缓存数据量已经饱满，不能再接收其他站点的数据帧，就向对方站点发送一个暂停帧，对方站点接收到这个暂停帧后，就在暂停帧内控制暂停时间取值，并推迟发送帧数据，停发的时间持续到规定暂停时间结束为止。采用暂停帧的方式来防止网络链路拥塞。

以太网中使用暂停帧方法是网络工作在全双工通信工作模式下，防止网络拥塞的技术，不适于半双工工作模式下的网络环境。

以太网在全双工通信工作模式下，网络中进行通信的站点可以是链路两端站点都支持暂停帧协议，也可以是仅仅链路两端的一个站点支持暂停帧协议。通过使用自动协商方式来确定链路两端站点中的哪一个站点支持暂停帧协议，增加使用暂停帧网络的灵活性。暂停帧的结构如图 8-16 所示。

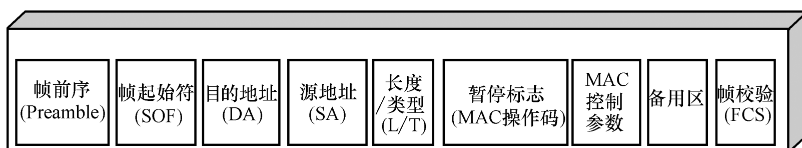


图 8-16　暂停帧的结构

8.7　物理层中数据的组织形态

计算机网络是数据网络，在进行数据通信的过程中，在 OSI 七层参考模型中不同层级上的数据块组织形式是不同的。

以太网中的数据、帧和数据报概念是不等同的。在进行通信的过程中，网络层向下交付的 IP 数据报到达数据链路层后，被封装为 MAC 帧，MAC 帧交付到物理层后，又被进一步封装成数据报。以太网中的节点要发送数据时，首先将每个 MAC 帧转变为串行比特序列，在物理信道中传输。

以太网设备在传输处理数据帧时，有一个帧间间隙（Inter-Frame Gap，IFG）。有了这样一段 IFG，设备获得一个准备接收下一个数据帧的时间区段。以太网的工作速率不同，这个 IFG 也不

同，对于 10Mbit/s 的以太网，IFG 为 9.6ms，对于 100Mbit/s 的以太网，IFG 为 0.96ms。

物理层将上一层交付的数据帧转换成物理的比特数据信息流，即码元数据流，通过网络物理信道发送出去。

不同层级间数据组织的方式如图 8-17 所示。

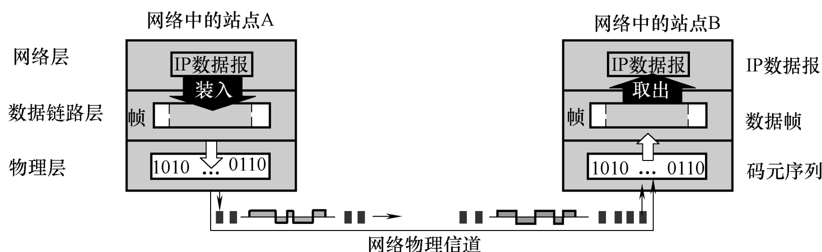


图 8-17　不同层级间数据组织的方式

站点接收数据，在物理层上接收的数据是码元序列，到了数据链路层数据被组织为数据帧。网卡（适配器）在计算机网络中，一方面负责接收网络上的数据报，通过和自己本身的物理地址相比较，决定是否为本机应接收的信息。解包后，将数据通过主板上的总线传输给本地计算机，另一方面将本地计算机上的数据打包后送出网络。用网卡实现局域网、传输介质之间的物理连接和电信号匹配，还涉及帧的发送与接收、帧的封装与拆封、媒体访问控制、数据的编码与解码以及数据缓存的功能等。网卡的一个重要功能就是要进行串行/并行转换。

通过网卡实现局域网通信的情况如图 8-18 所示。

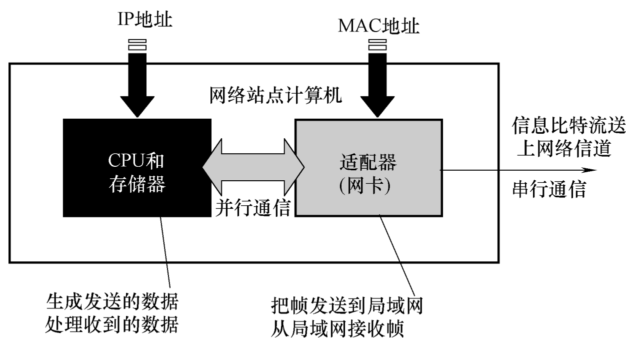


图 8-18　通过网卡实现局域网通信的情况

8.8　全双工交换式以太网

8.8.1　交换式以太网

1. 冲突域

在使用 CSMA/CD 媒体访问控制方式的以太网中，网络中的计算机在同时通信时会发生冲突，这个采用 CSMA/CD 支配网络使用公共通信信道的网络就是一个冲突域。使用中继器将若干个网段连接起来形成覆盖半径更大的网络仍然是一个冲突域。使用集线器连接的网络也是一个冲突域。使用交换机组织网络，交换机可以利用物理地址进行数据帧的复制端口选择，因此交换机的每一个端口就是一个冲突域。集线器不能进行数据帧的复制端口选择，只是将接收到的数据报以广播的形式发出去，因此集线器的所有端口为一个冲突域。

总的来说，冲突域就是连接在同一传输介质上所有工作站的集合，或者说是同一个物理网段

上所有节点的集合构成的局域网。

在传统的以太网中，采用 CSMA/CD 媒体访问控制协议。这种传统的媒体访问方法使众多的站点处于一个冲突域中，冲突域中的各站点共享同一个公共传输媒体，在任何给定时间内，共享媒体局域网只允许一个工作站有权发送信息，各站点共享网络固定的带宽。如果网上共连接了 n 个站点，那么每个站点平均分享到的带宽只有总带宽的 $1/n$，当存在冲突时还要低，网络系统的效率会随着节点数的增加和应用的增多而大大降低。另外，由于冲突域的限制，传统的以太网也难以构建较大规模的网络。

2. 交换式局域网和技术原理

（1）交换式局域网

交换式局域网就是用交换机连接一些网段而形成的局域网。交换式以太网中一个端口就是一个冲突域，在半双工情况下，仍不能同时发送和接收数据。如果采用全双工模式，同一条数据链路中，两个站点可以在发送数据的同时接收数据，解决了这种情况下半双工存在的需要等待的问题，理论上，可以使传输速率提高一倍。由交换机连接的交换式以太网能增加传统以太网的带宽，同时又能与传统的电缆线和网络适配卡协调工作，因而可以保留已有的网络基本设施。

交换机接收并暂存传入的数据帧，根据目的地址和端口—地址表将数据帧转发到另一个输出端口。交换机本质上是一个高速的多口网桥，它们都工作在数据链路层的 MAC 子层。

（2）交换式网络技术原理

交换式以太网技术主要有静态以太网交换和动态以太网交换两种技术，还有动态口交换、动态段交换、静态口交换、静态板交换等。

1）静态以太网络交换：交换机内有 4 条以太网总线，工作站通过网络管理软件分别定义在 4 条总线上，定义到每一条总线上的工作站依然存在通信信道争用问题。

2）动态以太网络交换：动态以太网交换技术可以提供点对点通信，提供并行通信链路。网络中的站点要实现与另一个工作站间的通信，数据帧包含通信的源地址和目的地址，交换机即在源地址和目的地址之间建立一条独立的动态信道。

3）动态口交换：动态口交换技术是指定交换机的每一通信端口仅接入一个网络站点，多个网络站点间通过数据帧的源地址和目的地址建立多个并行的物理通信信道。

4）动态段交换：动态段交换是指某些连接多个工作站的端口，每个端口保留多个地址项，端口上工作站间通信不经过交换机的系统总线，而端口间链路的建立通过地址表来完成。

5）静态口交换：静态口交换是指通过网管系统将某一个工作站定义到某一条总线上，此工作站的通信只与此总线联系。

6）静态板交换：静态板交换是通过网管系统将某一块板移至某一条总线上，板上所有连接的工作站即与此条总线通信。

8.8.2 全双工交换式以太网

1. 应用背景

如前所述，工业以太网由于技术成熟、使用方便、有统一的标准、开放性好、可以实现不同厂商的产品互联，是一种开放式标准网络。它的通信速率高、传播速度快、可分段地实现远程访问、诊断和维护保养容易、支持冗余连接配置、系统容量大、投资成本低，早已成功地应用于工控领域，并展现了非常好的前景。楼宇自控领域可以认为是工业控制领域向建筑物内的延伸，以太网应用于 BAS 也将成为楼宇智能控制中的主流技术之一。对于采用 CSMA/CD 的媒体访问方法的以太网来讲，其实时性和确定性不好，使得它应用于工业控制领域受到很大限制。随着以太网通信速率的提高、网络负荷减轻和传输时延减少、网络碰撞几率下降，使得情况得到了很大改

观。如果采用全双工和交换式以太网技术，则使以太网交换机的各端口之间数据的传输不再受 CSMA/CD 媒体访问控制方式的制约。使用全双工通信方式使端口间两对双绞线（或两根光纤）上分别同时接收和发送数据，而不发生冲突，使数据传输效率大幅度提高。交换式和全双工以太网的出现，克服了传统以太网的共享公共传输媒体和半双工传输的缺点，实现了站点独占传输媒体并同时收发数据，也减少了网络上的数据碰撞。由于这样的原因，全双工交换式以太网在工业控制领域成为一种控制实时性好、可靠性高的控制网络方案，同样可以应用到楼宇控制领域，即可使用全双工交换式以太网构建 BAS。

2. 全双工交换式以太网技术

20 世纪 90 年代初，随着计算机性能的提高及通信量的剧增，交换式以太网技术应运而生，大大提高了局域网的性能。局域网交换技术的发展要追溯到两端口网桥，网桥是一种存储转发设备，用来连接相似的局域网。从互联网的结构看，网桥可以实现数据通信设备级的端到端连接；从协议层次看，网桥是在逻辑链路层对数据帧进行存储转发。以太网交换机与网桥之间无严格界线，其性能指标和结构安排可以非常相似，甚至可以将交换机看成是功能更完善的网桥。但是，以太网交换技术是网桥技术的发展与升华。

全双工传输指同时发生在两个方向上的一种数据传输方式。IEEE 802.3x 标准中，全双工通信模式是在节点（站点）之间提供了有独立的发送与接收信道的点对点链路，从而可在节点（站点）之间同时收发交换信息。因而在全双工通信工作模式中，不再需要在“半双工通信工作模式”中使用的 CSMA/CD 媒体访问控制协议来控制每个节点（站点）帧信息的发送与接收。

以太网内的客户端在进行通信时，交换机检测从以太网端口来的数据包的源和目的 MAC（媒体访问控制）层地址，然后与系统内部的动态查找表进行比较，若数据包的 MAC 层地址不在查找表中，则将该地址加入查找表中，并将数据包发送给相应的目的端口。

交换式局域网就是用交换机连接一些网段而形成的局域网。交换式以太网中一个端口是一个冲突域，在半双工情况下，仍不能同时发送和接收数据。如果采用全双工模式，同一条数据链路中两个站点可以在发送数据的同时接收数据，解决了这种情况下半双工存在的需要等待问题，理论上可以使传输速率提高一倍。全双工通信技术可以使设备端口间两对双绞线（或两根光纤）上同时接收和发送报文帧，从而也不再受到 CSMA/CD 媒体访问控制方式的约束，这样，任一节点发送报文帧时，不会再发生碰撞，冲突域也就不复存在。对于紧急事务信息，则可以应用报文优先级技术，使优先级高的报文先进入排队系统首先进行处理和转发。通过这种优先级排序，使工业现场中的信息处理和现场执行器对控制器或中央管理工作站发出的控制指令能够按照给定的优先级和顺序执行。

3. 全双工交换式以太网技术的优点

（1）组织网络简洁

全双工交换式以太网不需要改变网络其他硬件，包括电缆和用户的网卡，仅需要用交换式交换机代替共享式集线器，节省用户网络升级的费用，可在高速与低速网络间转换，实现不同网络的协同。目前大多数交换式以太网都具有 100Mbit/s 的端口，通过与之相对应的 100Mbit/s 的网卡接入到服务器上，暂时解决了 10Mbit/s 的瓶颈，成为局域网升级时的首选方案。

（2）多通道通信和有更大的带宽

它同时提供多个通道，比传统的共享式集线器提供更大的带宽，传统的共享式 10Mbit/s/100Mbit/s 以太网采用广播式通信方式，每次只能在一对用户间进行通信，如果发生碰撞还得重试，而交换式以太网允许不同用户间进行传送，比如一个 16 端口的以太网交换机允许 16 个站点在 8 条链路间通信。

（3）有多种制式的网络支持全双工交换式以太网

支持全双工通信工作模式的物理层规范众多。有 10Base-T、10Base-FL、100Base-TX、100Base-FX、100Base-T2、1000Base-CX、1000Base-SX、1000Base-LX 和 1000Base-T 9 种，只有 10Base-5、10Base-2、10Base-FP、100Base-T4 4 种不支持全双工通信工作模式。

（4）增加网段覆盖距离

全双工通信工作模式比半双工通信模式吞吐量增加一倍，而且由于无竞争与碰撞发生，提高了工作效率。此外，也不需要麻烦的补偿等待时间（Back-off Time）的计算，更不需要考虑所谓的捕获效应（Capture Effect）。由于网络尺寸不再受时隙（ST）的约束，因而其网径得到明显的提高。例如，在 100Base-FX 介质规范中，当采用半双工通信模式时，最大网段长度仅为 412m，而采用全双工通信工作模式时，其最大网段长度可达 2000m。

（5）可进行端口工作模式配置

目前市场上新的交换机端口都支持全双工、半双工和自协商工作模式，可以通过配置来更改其工作模式。以一款华为交换机为例，使用以下配置命令：

```
[Quidway-ethernet0/1]  duplex {auto | full | half}
```

其中，auto 表示端口工作在自协商模式；full 表示端口工作在全双工模式；half 表示端口工作在半双工模式。

4. 接入全双工交换式局域网的控制器节点时延分析

由于 BAS 中的被控对象有较多的风机、水泵阀门及常规的机电设备，和绝大多数的工厂自动化控制应用一样，控制的响应时间为 5～10ms，这种准确度的控制响应时间足够了。

基于交换式以太网传输产生的时延一般可以分为 3 个部分，分别是信息传递过程中在源节点、通信信道和目的节点内所发生的时延。目前市场上，最普通和廉价的交换机一般采用输出缓存交换方式和最基础的先进先出（FIFO）调度算法，而且不提供优先级服务。通信网络模型采用二级交换模式，两级之间的 UTP 线缆最大长度为 100m，且一二级交换机上节点数分别为 10 和 12 个，两级交换机的上行端口的通信速率都设为 10Mbit/s，均采用存储转发方式，并假设每个从站发送数据的规律都相同，每 10ms 发送一个最小以太网帧，最小帧长为 64B。则可以算出其时延约为 6.61ms；当两级交换机的上行端口的通信速率都为 100Mbit/s，并使发送周期性数据的节点附加上非周期性数据，即从站除了每 10ms 发送一个最小以太网帧外，还发送突发性实时数据。其平均发送速率为周期性实时数据的 0.01 倍的发送速率，且至多连续发送 10 个数据帧，经计算其时延约为 7.46ms，是系统控制网络的一种完全可行和可靠的先进技术。

第 9 章　工业以太网与实时以太网

9.1　工业以太网与实时以太网概述

研究结果证明，以太网技术在 BAS 中的应用有着非常好的前景以及极大的发展空间。

9.1.1　工业网络

在工业控制系统中，实时可定义为系统对某事件反应时间的可测性。也就是说，在一个事件发生后，系统必须在一个可以准确预见的时间范围内做出反映。然而，工业上对数据传递的实时性要求十分严格，往往数据的更新是在数十毫秒内完成的。而同样由于以太网存在的 CSMA/CD 机制，当发生冲突的时候，就得重发数据，最多可以尝试 16 次之多。很明显这种解决冲突的机制是以付出时间为代价的。而且一但出现掉线，哪怕是仅仅几秒种的时间，就有可能造成整个生产的停止甚至是设备故障及引起人身安全事故。

工业网络必须具备较好的可靠性、可恢复性以及可维护性，即保证一个网络系统中任何组件发生故障时，不会导致应用程序、操作系统，甚至网络系统崩溃和瘫痪。

工业控制网络直接面向生产过程和控制，肩负着生产现场测量与控制信息传输的任务。工业控制网络满足强实时性与确定性、高可靠性与安全性，还要适应工业现场的恶劣环境，满足总线供电与本质安全等特殊要求。工业控制网络是控制域网络，现场总线、工业以太网、工业以太网中的实时以太网、BAS 中的控制层级网络如 MS/TP 网络和 CAN 总线等都属于控制网络。

工业控制网络传输的信息多为数据量不大的指令和信息，数据量小，信息交换频繁；而信息网络传输的信息数据量大，互相交换的信息不频繁；工业控制网络中周期性与非周期性信息采集和指令发送同时存在；而信息网络主要接收、处理以及发送非周期数据信息。

工业控制网络的信息流向确定性强，监测信息由传感器和变送器向控制器传送，控制信息由控制器向执行机构传送，过程监控与突发信息由现场仪表向操作站传送，程序下载由工程师站向现场仪表传输等；信息网络的信息流向不具有这样的确定性。

工业控制网络中监控信息的传送顺序性强：监测信息首先传送到控制器，由控制器进行判别计算，发出的控制指令发送给执行机构；工业控制网络能够适应高温、潮湿、振动、腐蚀、电磁干扰等工业环境，在这种环境下具有长时间、连续、可靠、完整地传送数据的能力，并能抵抗工业电网的浪涌、跌落和尖峰干扰。

9.1.2　以太网、工业以太网和实时以太网

1. 以太网技术的发展

进入 21 世纪以来，IT 界已经不再寻找替代以太网的技术，转而寻找增强以太网的功能和将它扩展到新领域的途径。现代以太网组网功能已经大大地超越了基本的以太网功能。TCP/IP 与以太网的组合有着极为良好的发展前景。

在建筑智能化信息化技术领域，TCP/IP 以太网不仅作为信息服务、管理、监控的网络平台，而且越来越成为视频、语音等应用的支撑平台。基于以太网的多个子系统融合的、结构优化的、可靠的、一体化的系统已经不是一种方向性的讨论了。在现代建筑的机电设备监控系统中，现场

控制网络采用工业控制以太网已不是个别的案例。

传统以太网在共享的公共传输媒体上以半双工传输模式数据，而半双工传输模式工作必然导致在公共传输媒体上站点发送帧的碰撞。这种帧碰撞效应不仅限制了站点的传输带宽，而且还构成了束缚传输范围的碰撞域，大大影响了传输媒体的传输距离。交换型和全双工方式工作的以太网克服了传统以太网的共享公共传输媒体和半双工传输的弱点，实现了站点独占传输媒体并同时收发数据。近 20 年来，随着网络技术及其应用的迅速发展，以太网技术及其标准不断更新和扩展。目前的以太网不仅在物理层上对于拓扑结构、数据传输速率和传输媒体有了很大的变化和发展，而且在数据链路层上与原来的传统以太网标准有了很大的变化，随着以太网的发展及其标准的建立，到目前为止，以太网标准系列已扩展成 20 余个。

2. 商用以太网设备技术规范

商用以太网设备技术规范见表 9-1。

表 9-1　商用以太网设备技术规范表

项　　目	技 术 规 范	项　　目	技 术 规 范
元器件	商用级别	安装方式	桌面、机架
接口	普通 RJ-45	工作温度	5 ~ 40℃
电源冗余	无	电磁兼容性标准	EN 50081-2（办公室用 EMC）
网卡冗余	无	MTBF	3 ~ 5 年
传输线冗余	无		

3. 办公室和工业现场的环境对比

办公室环境和工业现场环境差异很大，两者之间的对比见表 9-2。

表 9-2　办公室和工业现场环境的对比

	办公室（office）	工业现场（Industry）
安装（Irstalling）	1）建筑物的基本固定安装 2）设备在标准工作台安装 3）大多采用星形拓扑	1）依据工业现场铺线 2）不能在标准工作台安装 3）冗余铺线，常用环形拓扑
数据（Data）	1）大的数据块 2）中等网络可获得性 3）显著的非周期传送 4）实时性要求不强	1）小的数据块 2）很高的网络可获得性 3）显著的周期传送 4）实时性要求很高
环境（Environment）	1）正常温度 2）很少有灰尘、湿气、振动 3）很少有机械故障或化学问题 4）较低的 EMC 要求	1）异常温度范围 2）经常有灰尘、湿气、振动 3）有机械故障或化学问题 4）较高的 EMC 要求

9.1.3　关于现场总线和实时以太网的 IEC 61158 标准

工业控制网络由使用不同通信协议、标准的多种控制网络或称控制总线组成。现场总线和工业以太网中的实时以太网都是工业控制网络的重要成员。

目前，现场总线和工业以太网的标准主要有如下标准簇组成：IEC 61158 国际标准、IEC 61158 标准、IEC 62026 标准、ISO 11898 和 ISO 11519 标准等。

经过修改的 IEC 61158 国际标准于 1999 年 12 月投票表决正式获得通过，形成了 2000 版的

IEC 61158 标准。IEC 61158（2000）共容纳了 8 种现场总线协议，分别为 8 种通信类型：FF H1、ControlNet（美国 Rockwell Automation 公司支持）、PROFIBUS（德国 Siemens 公司支持）、P. Net（丹麦 Process Data 公司支持）、FF HSE（即原 FF H2，美国 Fisher Rosemount 公司支持）、SwiftNet（美国波音公司支持）、WorldFIP（法国 Alstom 公司支持）、Interbus（德国 Phoenix Contact 公司支持）。

第 4 版的 IEC 61158 国际标准将 20 种类型现场总线收录进标准规范体系，具体包含总线类型见表 9-3。

表 9-3　第 4 版 IEC 61158 国际标准包括的 20 种类型现场总线

类型	技 术 名 称	类型	技 术 名 称
Type1	TS61158 现场总线	Type11	Tcnet 实时以太网
Type2	CIP 现场总线	Type12	EtherCAT 实时以太网
Type3	PROFIBUS 现场总线	Type13	Ethernet Powerlink 实时以太网
Type4	P-NET 现场总线	Type14	EPA 实时以太网
Type5	FF-HSE 高速以太网	Type15	ModBus-RTPS 实时以太网
Type6	SwiftNet(被撤销)	Type16	SERCOSI、II 现场总线
Type7	WorldFIP 现场总线	Type17	VNET/IP 实时以太网
Type8	INTERBUS 现场总线	Type18	CC-Link 现场总线
Type9	FF H1 现场总线	Type19	SERCOS III 实时以太网
Type10	PROFINET 实时以太网	Type20	HART 现场总线

国际电工委员会 IEC/SC65C 制定了 IEC 61784 系列的配套标准，标准组成如下：

1）IEC 61784-1：用于连续和离散制造的工业控制系统现场总线行规集；

2）IEC 61784-2：用于 ISO/ IEC 8802. 3 实时应用的通信网络附加行规；

3）IEC 61784-3：工业网络中功能安全通信行规；

4）IEC 61784-4：工业网络中信息安全通信行规；

5）IEC 61784-5：工业控制系统中通信网络安装行规。

IEC 61784-1 规定了现场总线通信行规；IEC 61784-2 提供了实时以太网的通信行规。通信行规给出了接入现场总线的设备进行互通信、互操作的特征及选项说明。IEC 61784-2 通信行规具体规范了实时以太网中进行数据通信时的传递时间、网络中节点数、网络所使用的拓扑、中断节点交换机的数量、实时以太网的流通量、带宽、时间同步准确度和冗余恢复时间等。

9. 1. 4　工业以太网与普通商用以太网产品

技术上，工业以太网与 IEEE 802. 3 兼容，但工业以太网产品及普通商用以太网产品还必须与应用环境条件相匹配和适应。工业现场的设计者希望采用市场上可以找到的以太网芯片和媒介，兼顾考虑工业现场的特殊要求，即使用市场已有的以太网芯片和传输媒质，又同时解决耐高温、耐潮湿、抗振动，同时又能方便地安装在工业现场控制柜内的工业以太网产品。当然对电源也有要求，对电磁兼容性（EMC）也要求随工业环境对 EMI（工业抗干扰）和 ESD（工业抗振）要求的不同而变化。工业生产车间现场环境的安全标准与办公室的完全不同，前者许多情况下都要求应用系统具备恶劣环境的参数及额定值。工厂里采用的可能是工业控制柜标准，而 BAS 采用的往往是烟雾标准。

9.1.5 工业以太网的速度和覆盖距离

对工业以太网来说，10Mbit/s 和 100Mbit/s 的网络是常用的。在 10Mbit/s，全部采用双绞线的以太网网络中，要注意两个问题：网段和网络覆盖范围。网段指连接两个设备（集线器、交换机或主机）的距离，网络覆盖范围指网络中两个最远端设备之间的距离。不管是 10Mbit/s 还是 100Mbit/s 的网络，网段的最远距离不能超过 100m，采用综合布线的情况下，水平线缆的长度不能超过 90m，工作区线缆、交换机和楼层配线架之间的跳线距离之和达到 10m，因此总计长度还是 100m。在进行网络覆盖范围扩展或延伸时，常用到的规则就是 5-4-3 规则（仅仅针对 10Mbit/s 中继器）。规则的内容如下：一个网络最多有 5 个网段，4 个中继器，不多于 3 个混合网段。混合网段指的是同轴总线网段（已淘汰）。由于双绞线网段的最远距离是 100m，最大网络覆盖范围是 500m。

光纤网段的最远距离可达 2km，但 IEEE 802.3 标准规定，使用光纤级联数最多不能超过 3 个，且网络末端需使用双绞线，中间的两个为光纤网段，并保证每个网段不超过 1km。这样，整个光纤网段长度限制在 2km。

5-4-3 规则对 100Mbit/s 的工业以太网网络是不适用的。

9.1.6 全双工及自动协商

全双工传输（Full Duplex Transmission）指同时发生在两个方向上的一种数据传输方式。例如，局域网中的全双工传输方式是指：一个工作站在发送数据的同时也可以接收由另一个工作站发送来的数据。

只要有合适的设备支持，就可以在某些特定类型的局域网中实现全双工通信。是否实现全双工传输与网络媒体紧密相关。同轴电缆是由中心导体、绝缘材料层、网状织物构成的屏蔽层以及外部隔离材料层组成，不具备在两个方向上同时传输数据的能力，如果在连接中有两根电缆支持运行，就可以实现全双工传输。双绞线电缆由多根具有绝缘保护层的铜导线组成，所以在理论上，使用双绞线电缆作为传输媒体的网络能实现全双工模式。

1. 全双工以太网的特点

采用载波侦听多路访问/冲突检测（CSMA/CD）媒质访问控制方式的以太网，在任何一个时刻，总线上只能有一个站点在某个方向发送数据，这种数据传输方式是半双工传输方式。而 IEEE 802.3x 标准定义了全双工以太网，在全双工以太网中工作的工作站在接收数据的同时，还可以发送数据。

全双工以太网有如下一些主要特点：

1）能够同时发送和接收数据，即用全双工方式工作，工作带宽是半双工方式的两倍。10Base-T、10Base-FL、100Base-T4、100Base-TX、100Base-FX、100Base-T2、1000Base-X 的媒体系统支持全双工模式。

2）计算机的网络接口和交换机必须支持全双工模式。

3）使用和半双工以太网同样的数据帧格式，即最小帧长、帧间隙和 CRC 相同。

4）不使用 CSMA/CD 媒体访问控制方式，网络延伸距离不受 CSMA/CD 时槽的限制。

5）定义和使用显式的流量控制。

2. 全双工以太网的流量控制

在一个由交换机连接的交换式以太网中，如果一个连接在交换机 1000Mbit/s 端口上的高性能服务器向连接在交换机 100Mbit/s 端口上的普通计算机发送大量数据，会大量地消耗交换机的输入缓冲区资源，引起数据丢失。全双工以太网定义了显式的流量控制方式，对交换机的缓冲区

设置上限，到达上限时发送控制帧，来改变数据发送端的数据发送速率。

OSI 模型的数据链路层可划分出“逻辑链路控制（LLC）子层”和“媒体接入控制（MAC）子层”两个子层，IEEE 802.3x 标准把 IEEE 802 的数据链路层分成了 3 个子层，在 MAC 子层之上又加入了可选的 MAC 控制子层，MAC 控制子层可选，半双工以太网中不使用 MAC 控制子层。

全双工以太网在 MAC 控制子层定义了显式的流量控制。它使用 MAC Control 帧传送 PAUSE 命令，使全双工链路另一端的站点在一段时间内停止发送数据。

MAC Control 帧的数据块是以太网数据字段的最小长度 46B，前 2B 是操作码，PAUSE 命令的操作码为 Ox0001。MAC Control 帧的数据块中，还有 2B 表示请求链路对方停止发送数据的时间长度，以 512b 为单位，长度范围为 0 ~ 65536 个单位，过了这一时间长度，就可以再进行数据发送了。

流量控制使用协商模式。如在 10Mbit/100Mbit/s 自适应交换机中可以进行不使用/使用流量控制的配置。对称方式指链路两端都可以使用 PAUSE 命令进行流量控制，而非对称方式是指链路两端只有一端可以对另一端进行流量控制，一般多为交换机侧使用 PAUSE 命令进行流量控制对计算机进行流量控制，反之也可以。

全双工 1000Base-X 光纤千兆位以太网自动协商模式可以配置 4 种流量控制方式：不使用流量控制方式和使用流量控制方式。使用流量控制方式又分成 3 种：一个方向非对称方式、另一个方向非对称方式、对称方式。

3. 全双工工作模式及自动协商

全双工链路是扩展快速以太网（100Mbit/s）的关键。全双工的链接网段不能超过两个设备，可以是网卡或交换机端口。只有两块网卡时可以实施全双工通信，多于两块网卡时的全双工方式，必须考虑交换机。

10Base-T、10Base-FL 有单独的发送和接收通路，根据网卡或交换机端口的复杂性，可以执行全双工。如果这些接口配置在半双工方式下，用来接收、发送的同步侦测绘触发碰撞的侦测。同样的接口设置成全双工，由于全双工并不遵从共享型 CSMA/CD 规则，碰撞检测会被禁止。

网络使用双绞线链路是进行半双工或全双工工作方式自动速率匹配的条件之一，即具有自动协商功能的条件之一。光纤的情况有所不同，两个光纤设备的数据速率无法进行自动协商，这是因为 10Base-FL 设备工作在 850nm，100Base-FX 工作在 1300nm，自动协商速率无法进行。新推出的 100Base-SX 标准可以使 850nm 光纤在 10Mbit/s 或 100Mbit/s 下工作。100Mbit/s 下网段的距离为 300m。使用光纤的网络数据传输速率通常是固定的，不实行协商。自动协商协议在双绞线链路是重要的实现条件之一。自动协商的优点在于它使用户无需进行手工设置，完全由设备自身决定各自的工作速率。

9.1.7　一个工业以太网控制系统

一个基于工业以太网的控制系统网络结构如图 9-1 所示。系统中采用了冗余环技术。环形的网络拓扑结构能够增强网络的可靠性，但是就以太网协议本身而言，是不支持环形拓扑的，解决这个问题就要采用冗余环技术。工业以太网控制器之间、其他设备之间通信都通过了以太网交换机。为了增加系统的扩展性，数据交换能力采用了 OPC 服务器，这样解决了与 LON 总线数据源的数据交换问题。网络分成 3 级：设备层、控制层和信息层。从图 9-1 中可以看到，从设备层到控制层，再到信息层，都采用以太网，真正实现了企业办公自动化（OA）网络和工业自动化（IA）网络的无缝连接，有利于企业的信息集成。

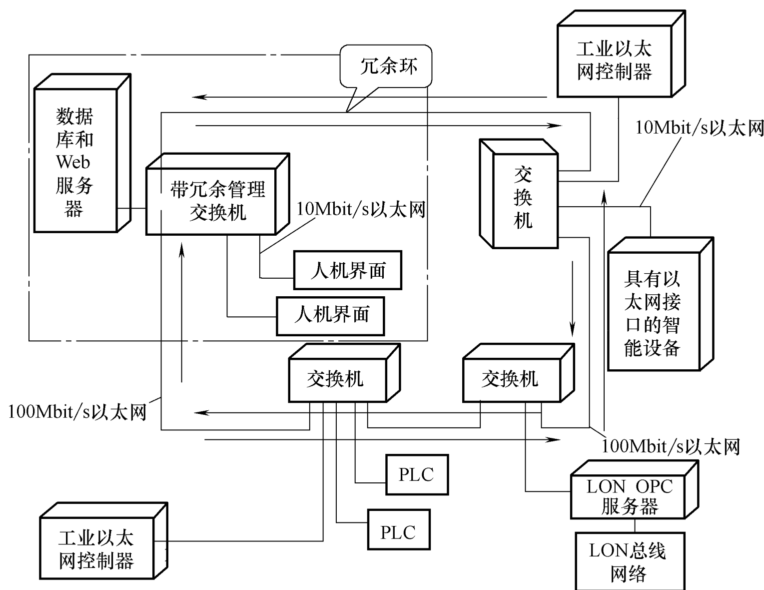


图 9-1　一个基于工业以太网的控制系统网络结构

9.2　设计和实现工业以太网应用系统要考虑的部分因素

9.2.1　传输介质与拓扑结构

1. 传输介质

工业以太网使用的电缆有屏蔽双绞线（STP）、非屏蔽双绞线（UTP）、多模或单模光缆。10Mbit/s 的速率对双绞线没有过高的要求，而在 100Mbit/s 速率下，推荐使用五类或超五类线。

光纤链接时需要一对，常用的多模光纤波长为 62.5μm/125μm 或 50μm/125μm。与多模光纤的内芯相比，单模光纤的内芯很细，只有 10μm 左右。通常，10Mbit/s 使用多模光纤，100Mbit/s 下，单模、多模光纤都适用。

2. 拓扑结构

在工业以太网中，由于普遍使用交换机，拓扑结构为星形或扩展星形。

3. 整体考虑

设计和实现工业以太网应用系统要考虑哪些因素？简单地说，要从以太网通信协议、电源、通信速率、工业环境认证考虑、安装方式、外壳对散热的影响、简单通信功能和通信管理功能、电口或光口的考虑。这些都是最基本需要了解的产品选择因素。如果对工业以太网的网络管理有更高要求，则需要考虑所选择产品的高级功能，如信号强弱、端口设置、出错报警、串口使用、主干冗余、环网冗余、服务质量（QoS）、虚拟局域网（VLAN）、简单网络管理协议（SNMP）、端口镜像等其他工业以太网管理交换机中可以提供的功能。

由于工业环境对工业控制网络可靠性能的要求很高，工业以太网的冗余功能应运而生。从快速生成树冗余（RSTP）、环网冗余（RapidRingTM）到主干冗余（TrunkingTM），都有各自不同的优势和特点，控制工程师们可以根据自己的要求进行选择。

工业以太网是应用于工业控制领域的以太网技术，在技术上与商用以太网（即 IEEE 802.3 标准）兼容，但是实际产品和应用却又完全不同。这主要表现在普通商用以太网的产品设计时，在材质的选用、产品的强度、适用性以及实时性、可互操作性、可靠性、抗干扰性、本质安全性

等方面不能满足工业现场的需要。故工业现场控制应用的是与商用以太网不同的工业以太网。

相比普通商业以太网，工业以太控制网络的硬件构成上还有如下变化：使用双冗余网卡。网络当中的每个节点采用双网卡进行故障冗余切换，每个节点分别连接到两台交换机（其中一台交换机作为另一台的热备份），交换机之间采用级联线相连。在双网卡中，主网卡监视网络连接是否正常，运行在上面的专用驱动软件监视网卡的工作状态，如果由于连接线路、交换机或者网卡出现故障，导致链路失效，那么监视软件会自动把MAC地址和所有连接从主网卡转移到备用网卡，并把这个备用网卡的信息广播出去，并通过备用交换机重建链路，使会话继续下去。双冗余网卡极大地提高了整个控制网络的可靠性。

4. 工业以太网不同于信息网络

工业以太网既有与信息网络相同的特点和安全要求，也有自己不同于信息网络的显著特点和安全要求：

1）整个企业网络按功能可分为处于管理层的通用以太网和处于监控层的工业以太网以及现场设备层（如现场总线）。管理层通用以太网可以与控制层的工业以太网交换数据，上、下网段采用相同协议自由通信。

2）工业以太网要为紧要任务提供最低限度的性能保证服务，同时也要为非紧要任务提供尽力服务，所以工业以太网同时具有实时协议也具有非实时协议。

3）工业以太网应该保证实时性不会被破坏，在商业应用中，对实时性的要求基本不涉及安全，而过程控制对实时性的要求是硬性的，常常涉及生产设备和人员安全。

9.2.2　以太网和控制网络的集成及硬件设备可靠性解决方案

1. 以太网与控制网络的集成

企业网络一般包含处理企业管理与决策信息的信息网络和处理企业现场实时测控信息的控制网络两部分。信息网络一般处于企业中上层，处理大量的变化多样的信息，具有高速、综合的特征。控制网络主要位于企业中下层，处理实时的、现场信息，具有协议简单、容错性强、安全可靠、成本低廉等特征。

因此，企业网络是控制网络与信息网络的集成，实现集成、统一的企业网络成为企业综合自动化与信息化的努力目标。

2. 工业以太网硬件设备可靠性解决方案

从抗击恶劣环境上讲，工业以太网的元器件、接口全部达到工业级要求，具有耐腐蚀、防尘、防水特性，比如采用加固型的RJ-45或者DB-9代替一般商用的RJ-45接口；工业以太网设备能够工作在更宽广的温度范围之内：−40～85℃；电磁兼容性标准遵守EN50081-2，即工业级EMC标准；MTBF至少10年。

9.3　关于工业以太网和实时以太网技术的问题

由于确定性通信技术和环境适应性等关键问题的解决，工业自动化系统控制级以上的通信网络正在逐步统一到工业以太网，并正在向现场设备级延伸，工业以太网技术正在加快在各个行业和领域的推广应用，但也有一些问题困扰着业界人士。

1. 现场总线技术是否会被以太网技术所代替

随着工业以太网技术的不断完善，现场总线技术是否会被以太网技术所代替，以太网技术是否就是现场总线的未来？对于工业以太网技术来讲，有没有可能重演几年前现场总线国际标准，经过长时间的争论，最后达到妥协形成多种协议和标准并存的局面。

目前许多国家和企业都大力发展工业通信领域的工业以太网技术，以太网技术的成熟和普及明显地将会使控制系统成本降低和协议标准化。采用以太网和工业以太网作为控制域网络，可以便利地将控制系统接入 Internet，而采用 Internet 技术将会使目前所谓集中型自动化系统真正成为带有分散型智能化的网络控制系统。

由于没有一个关于哪几种工业以太网和实时以太网能够进入主流应用的具体标准规范能够被制定出来的清晰图景，未来较短的时间内，不会出现工业以太网完全代替现场总线的一面倒局面，而将继续维持现场总线和工业以太网并存应用的局面，但同时工业以太网在工控领域的应用深度和范围将继续加深加大。

目前出现的许多工业以太网的通信方案，有些是作为现场总线的补充，有些作为现场总线的替代。国际电子委员会 SC65C 已经开始制定一个关于“Additional Profiles for ISO/IEC 8802-3 based communication networks in real time applications”的新的 IEC 61784-2 标准，这工作由最近成立的 IEC65C/WG11 以“Real Time Ethernet”名义来进行。国际电子委员会也开展了制定用于工业以太网网络连接器的标准工作，这些工作是由 IECSC65C 专家与其他 IEC 合作委员会的专家合作进行的。在 IEC 61158 国际标准中已经存在了 Ethernet/IP（Fieldbus Foundation High Speed Ethernet 以太网工业协议）FF-HSE（Fieldbus Foundation High Speed Ethernet：基金会高速现场总线）和 PROFINET（用于过程自动化的工业以太网）的协议规范。并也写在 IEC 61784-1 的相应规范中。所有三个规范都是建立在 IEEE 802. x 的以太网规范上的。当然它不涉及以太网的变形，而仅仅是指以太网应用。

2. 工业以太网发展趋势

早在 2004 年，PROFIBUS 贸易组织（PROFIBUS Trade Organization，PTO）和 Interbus Club 成立联合工作组就决定将 INTERBUS 现场总线控制系统向 PROFINET 工业以太网控制系统过渡。西门子公司也积极地向市场全面推出 PROFINET 工业以太网控制系列产品。在工业以太网控制系统中网络节点性价比高，已有大量软件平台技术能得到应用，诊断功能强，资深的专家作出预见，PROFINET 的应用节点数今后会急剧增加。PROFINET IO 将会逐步取代 PROFIBUS 和 Interbus 现场总线，在市场上被广大用户接受，这将是工业以太网技术发展的重要趋势。

国际上许多标准组织正在积极地工作以建立一个工业以太网的应用协议。工业自动化开放网络联盟（Industrial Automation Open Network Alliance，IAONA）协同 ODVA（Open Devicenet Vendor Association，开放设备网制造商协会）和国际开发协会（IDA）共同开展工作，并对推进基于 Ethernet TCP/IP 工业以太网通信技术达成共识，由 IAONA 负责定义工业以太网公共的功能和互操作性。经过努力，不久的将来就会出现一个具有互操作性的工业以太网。

3. 实时以太网通信芯片和软实时（SRT）机制

实时以太网技术在实施中可以采用商业以太网通信芯片，也可以采用专为实时以太网开发的专用通信芯片，也可以采用实时以太网介质访问控制协议 RT-CSMA/CD 实现软实时机制。网络中的节点分为实时与非实时两类，非实时节点可以继续使用 CSMA/CD 媒质访问控制方法，而实时节点遵循 RT-CSMA/CD 协议，其实时性能等级可达到毫秒级。使用专用实时以太网通信芯片，在高准确度运动控制中，用它来支持多个网络节点间的严格精确同步时，其实时性能等级可达到微秒级。

4. 现场总线与工业以太网并存及应用

在现场总线体系中，基于以太网的通信协议除了 IEC 61784-1 中包含的 HSE、Ethernet/IP、PROFINET 以外，还包括了 EtherCAT、Ethernet Powerlink、Vnet/IP、TCnet、ModBus/IDA 和国内推出具有自主知识产权的 EPA 等标准。

在多种现场总线与工业以太网并存的情况下，工业现场的多层异构网络之间只有通过采用

PC、可编程序控制器（PLC）、DSP 或其他专用设备构成的网关实现互联。当然网关在网络中的作用实际上还包括对实时域和非实时域的隔离。

5. IEC 61784-2 与实时以太网

基于 IEC 61784-2 标准的实时以太网见表 9-4。

表 9-4　基于 IEC 61784-2 标准实时以太网

CPF 族	技　术　名	IEC/PAS NP#	提出组织	Ethertypes
CPF2	Ethernet/IP	IEC/PAS 62413	ODVA	OX0800 IP
CPF3	PROFINET	IEC/PAS 62411	PI	OX8892
CPF4	P-Net	IEC/PAS 62412	IEC 丹麦委员会	OX0800 IP
CPF6	INTERBUS		INTERBUS 俱乐部	OX8892
CPF10	Vnet/IP	IEC/PAS 62405	IEC 日本委员会	OX0800 IP
CPF11	TCnet	IEC/PAS 62406	IEC 日本委员会	OX0888B
CPF12	EtherCAT	IEC/PAS 62407	ETG	OX088 A4
CPF13	Ethernet Powerlink	IEC/PAS 62408	EPSG	OX088 AB
CPF14	EPA	IEC/PAS 62409	IEC 中国委员会	OX088 BC
CPF15	ModBus-RTPS	IEC/PAS 62030	ModBus-IDA	OX0800 IP
CPF16	SERCOS-III	IEC/PAS 62410	SI	OX088 CD

从表 9-4 中知道：进入国际标准的实时以太网共有 11 种类型。表中还给出了各种实时以太网和实时以太网通信行规集（Communication Profile Familiy，CPF）以及 IEC/PAS 的对应关系。

通信行规对于总线设备中可互通信和互操作性特征与选项进行了说明，并具体规定了实时以太网传递的时间、网络挂接终端节点数量限制、基本网络拓扑、终端节点间交换机数、RTE 流通量、RTE 带宽、时间同步准确度以及冗余恢复时间等。

下面仅仅介绍部分主要的实时以太网技术。

9.4　Ethernet/IP

9.4.1　Ethernet/IP 通信协议模型

Ethernet/IP 是一个面向工业自动化应用的工业应用层协议，这里的 IP 表示为工业协议（Industrial Protoco1）Ethernet/IP 可以和现在所有的标准以太网设备兼容使用，是实时以太网通信行规中的重要组成成员之一。

Ethernet/IP 网络中，控制器与现场中的传感器和执行器之间的数据信息传输完全满足控制域的实时性要求。非周期性信息数据的可靠传输（如程序下载、组态文件）采用 TCP 技术，而有时间要求和周期性控制数据的传输由 UDP 的堆栈来处理。Ethernet/IP 通信协议模型如图 9-2 所示。

Ethernet/IP 协议栈结构如图 9-3 所示。

Ethernet/IP 实时以太网技术是由 ControlNet 国际组织 CI、工业以太网协会 IEA 和开放的 Device Net 供应商协会 ODVA 等共同开发的工业以太网标准。Ethernet/IP 在 TCP/IP 上附加了 CIP（Common Industrial Protocal，通用工业协议），在应用层进行实时数据交换。CIP 的控制功能部分用于实时 I/O 报文（或隐形报文），信息表述和传输处理部分用于报文交换，也叫显性报文。

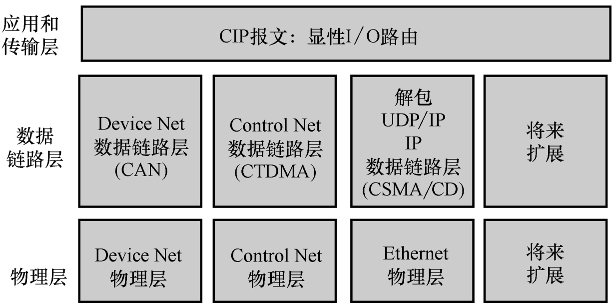


图 9-2　Ethernet/IP 通信协议模型

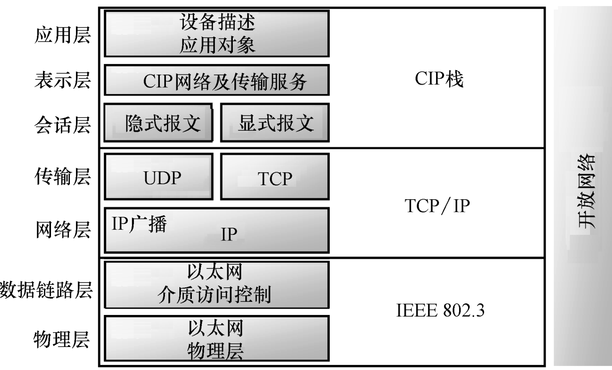


图 9-3　Ethernet/IP 协议栈结构

CIP 控制和信息协议作为 Ethernet/IP 的特色部分，其目的是为了提高设备间的互操作性。CIP 一方面提供实时 I/O 通信，另一方面实现信息的对等传输。其控制部分用来实现实时 I/O 通信，信息部分用来实现非实时的信息交换。并且采用控制协议来实现实时 I/O 报文传输或者内部报文传输，采用信息协议来实现信息报文交换和外部报文交换。CIP 采用面向对象的设计方法，为操作控制设备和访问控制设备中的数据提供服务集。运用对象来描述控制设备中的通信信息、服务、节点的外部特征和行为等。

CIP 提供了一系列标准的服务，使用“隐式”和“显示”方式对网络节点数据进行访问和控制。CIP 数据包根据请求服务类型被赋予一个报文头。通过以太网传输的 CIP 数据包具有特殊的以太网报文头，一个 IP 头、一个 TCP 头和封装头。封装头包括了控制命令、格式和状态信息、同步信息等。这允许 CIP 数据包通过 TCP 或 UDP 传输并能够由接收方解包。Ethernet/IP 不仅擅长处理传输数据量很小的监控指令数据，还适于发送大数据量的数据块。

通过 CIP，供货商、机器制造商、系统集成商以及用户可以充分利用工业以太网技术，并将 I/O 控制、组态、诊断、信息、安全、同步及运动控制集成在一起。

Ethernet/IP 基于 IEEE 802.3 物理层和数据链路层标准，采用通用工业协议（CIP），支持同一物理信道上完整实现设备组态、实时控制、信息采集等全部网络功能。

Ethernet/IP 支持 10Mbit/s 和 100Mbit/s 产品；所有产品提供内置的互联网服务器功能（web server）；网络支持多种传输介质：铜缆、光纤、光纤环网、无线网络等。

为了减少 Ethernet/IP 在各种现场设备间数据传输的复杂性，Ethernet/IP 预先做了一些设备的标准规定，如气动设备等不同类型的规定。

Ethernet/IP 基于 TCP/IP 系列协议，因此采用 OSI 层模型中较低的 4 层。所有标准的以太网通信模块，如 PC 接口卡、电缆、连接器、集线器和开关都能与 Ethernet/IP 共享使用。

Ethernet/IP 应用层协议是基于控制和信息协议（CIP）层的，使用所有传统的以太网协议，构建于标准以太网技术之上，Ethernet/IP 可以和现在所有的标准以太网设备无缝互联。

9.4.2　Ethernet/IP 实时以太网系统结构

Ethernet/IP 技术可直接采用现成商用以太网的 TCP/IP 芯片、物理媒体和协议组，支持显性和隐性报文。Ethernet/IP 实时以太网系统结构如图 9-4 所示。

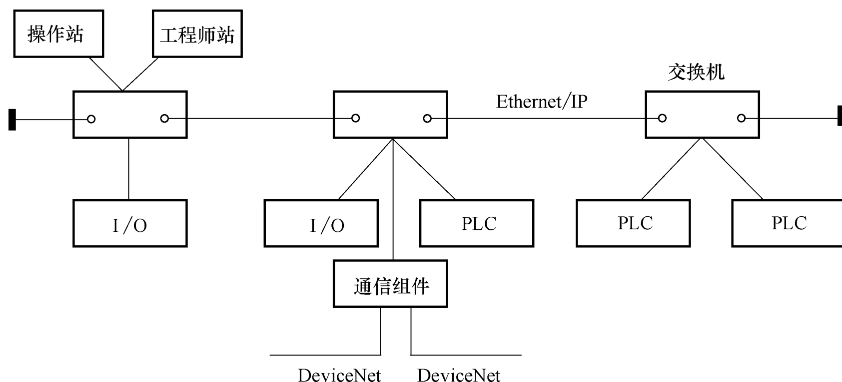


图 9-4　Ethernet/IP 实时以太网系统结构

Ethernet/IP 网络使用有源星形拓扑结构，从图 9-4 中看到，控制器和智能控制装置的 I/O 接口与交换机直接相连，操作站和工程师站也直接挂接在交换机上。星形拓扑结构的优点是支持 10Mbit/s 和 100Mbit/s 的产品，可以将其混合使用 1000Mbit/s、100Mbit/s 和 10Mbit/s 的交换机；系统接线简便、容易查找故障、维护方便。Ethernet/IP 实时以太网监控系统基于 Web 方式工作，使用标准的 IE 浏览器，可在客户端直接读写数据，解读诊断信息以及建立用户自定义界面。

一个使用 Ethernet/IP 实时以太网组建的监控系统如图 9-5 所示。

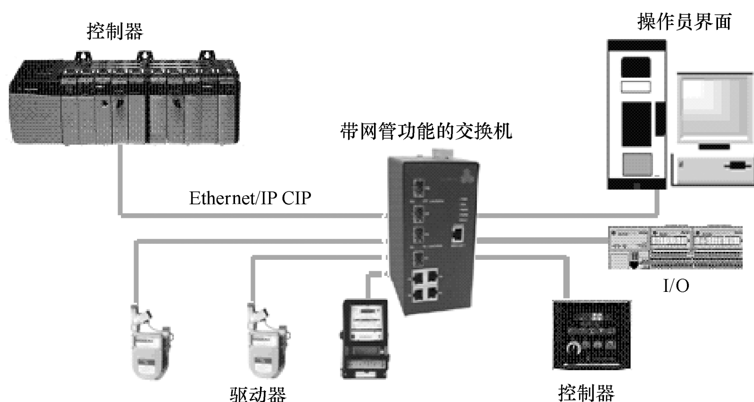


图 9-5　一个使用 Ethernet/IP 实时以太网组建的监控系统

使用 Ethernet/IP 实时以太网组建的系统可以是拥有大量节点数的监控系统，也可以是小规模的监控系统。网络覆盖的长度在使用 10/100Base-T 时，是 100m，使用光纤时，覆盖范围可达到 35～2000m，当然与适用类型和速率有关。通信速率可以是 10Mbit/s、100Mbit/s、1000Mbit/s；网络组织拓扑多用星形拓扑，也可以使用菊花链路拓扑结构。Ethernet/IP 实时以太网采用可管理的全双工交换机，避免网络数据冲突。

Ethernet/IP 网络中，控制器与现场中的传感器和执行器之间的数据信息传输完全满足控制域的实时性要求。非周期性的信息数据的可靠传输（如程序下载、组态文件）采用 TCP 技术，而有时间要求和周期性控制数据的传输由 UDP 的堆栈来处理。

9.5　PROFINET

9.5.1　PROFINET 简介

PROFINET 是在西门子公司的支持下，由 PROFINET International（PI）组织提出的基于以太网的自动化标准。从 2004 年 4 月开始，PI 与 INTERBUS Club（INTERBUS 总线俱乐部）联手，负责合作开发与制定 PROFINET 的标准。

PROFINET 的第 2 版本中，提出了两种工业以太网的通信机制，采用 TCP/IP 通道来实现非实时数据的传输，如用于设备参数、组态和读取诊断数据的传输。传输实时数据是通过将 OSI 模型的网络层和传输层进行旁路，实现实时数据通道，传输的实时数据存放在 RT（Real-Time，实时）堆栈上，实现传输时间的确定性。为了减少通信堆栈的访问时间，PROFINET 的第 2 版本协议对传输数据的长度作了限制。因此在实时通道上传输的数据主要是用于现场 I/O 数据、事件控制的信号与报警信号等。为优化通信功能，基于 IEEE 802.1P 定义了 PROFINET 报文的优先权，规定了 7 级的优先级。

PROFINET 构成从 I/O 级直至协调管理级的基于组件的分布式自动化系统的体系结构方案。PROFIBUS 现场总线技术和 INTERBUS 现场总线技术可以在整个 PROFINET 系统中无缝地集成。通过代理服务器技术，PROFINET 除了可以和 PROFIBUS 总线集成，同时也可以无缝集成其他总线标准。

根据响应时间的不同，PROFINET 支持以下 3 种通信方式：TCP/IP 标准通信、实时（RT）通信和同步实时（Isochronous Real-Time，IRT）通信。

TCP/IP 标准通信是基于工业以太网技术和 TCP/IP 的通信。虽然基于 TCP/IP 的通信过程其响应时间约在 100ms 的量级，但是对于工厂控制级的应用来说，许多实际应用是足够的。

实时（RT）通信：控制器和传感器及执行器间的数据交换，控制系统对响应时间的要求更为严格，因此 PROFINET 提供了一个优化的、基于以太网数据链路层的实时通信通道，通过该实时通道，极大地减少了数据在通信栈中的处理时间，PROFINET 实时通信（RT）的典型响应时间是 5 ~ 10ms。

同步实时（IRT）通信：在现场级通信中，对通信实时性要求最高的是运动控制，PROFINET 的同步实时（IRT）技术可以满足运动控制的高速通信需求，在 100 个节点下，其响应时间要小于 1ms，抖动误差要小于 1μs，以此来保证及时的、确定的响应。

PROFINET 基于工业以太网的自动化开放标准，其部分目标是：

1）工业以太网和标准以太网组件可以一起使用；

2）使用 TCP/IP 和 IT 标准；

3）能够和特定的现场总线系统无缝集成。

由于 PROFINET 采用模块化结构，可以轻松地对其进行升级以集成其他功能；工程调试工作量较小；可大幅度提高系统的开放性。

9.5.2　PROFINET 通信协议模型

PROFINET 通信协议模型如图 9-6 所示。

从图 9-6 中知道，PROFINET 提供了一个标准数据通信信道和两类实时数据通信信道。标准数据通信信道使用 TCP/IP，主要用来进行设备参数设置、模块工作组态设置和读取诊断数据。实时数据通信信道是软实时（Software RT，SRT）方案，主要用于过程数据的高性能循环传输、事件控制的信号与报警信号等。它旁路 OSI 模型的网络层和传输层，提供高实时性、高可靠性通信能力。

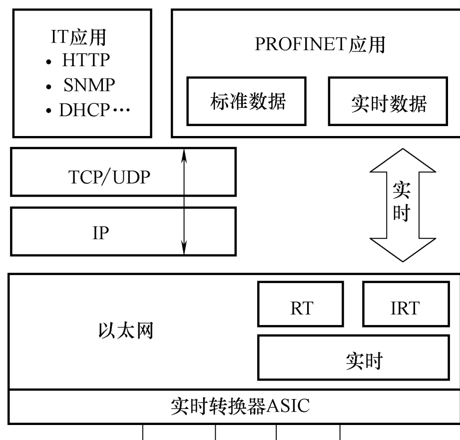


图 9-6　PROFINET 通信协议模型

9.5.3　PROFINET 技术中的部分重要概念

1. PROFINET 环境中的设备

PROFINET 环境中的设备是指：

1）自动化系统（例如 PLC、PC）；

2）现场设备（如 PLC、PC、液压设备、气动设备）以及有源网络组件（例如交换机、网关、路由器）。

根据设备连接到总线的方式来区分以下设备类型：

1）PROFINET 设备；

2）PROFIBUS 设备。

2. PROFINET 设备

一个 PROFINET 设备至少始终有一个 PROFINET 连接，还可以有一个 PROFIBUS 连接，并且可以作为具有代理功能的主站。

3. PROFIBUS 设备

一个 PROFIBUS 设备至少有一个与电气（RS-485）或光纤接口的 PROFIBUS 连接。PROFIBUS 设备不能直接参与 PROFINET 通信，必须通过具有 PROFINET 连接的 PROFIBUS 主站或具有代理功能的工业以太网/PROFIBUS 连接器（IE/PB 连接器）才能实现。

对于 PROFINET，需要的数据传输速率至少为 100Mbit/s（快速以太网）全双工的工作模式。

4. PROFINET 通信

PROFINET 通信是通过工业以太网进行的，支持以下传输类型：

1）工程数据与对时间要求严格的数据（例如参数和组态数据、诊断数据、报警）的非周期性传输；

2）用户数据（例如过程值等）的周期性传输。

5. 实时通信

当进行时间要求严格的 I/O 用户数据进行通信时，PROFINET 将使用自己的实时通道，而不是 TCP/IP 方式。

6. 关于实时和确定性描述

实时是指系统在定义的时间内处理外部事件。确定性是指系统以可预测（确定的）方式响应。PROFINET 可以用作确定的实时网络，其功能如下：

1）在保证的时间间隔内传输对时间要求严格的数据；

2）可以准确确定（预测）进行数据传输的确切时间，这可确保使用其他标准协议的通信可以在同一网络中无故障进行。

7. 存储转发

PROFINET 网络使用存储转发方法时，交换机将存储消息帧，并将它们排成一个队列。这些

消息帧随后将有选择性地转发给可访问已寻址节点的特定端口（存储转发），如图 9-7 所示。这种方法的优点在于不需要消息帧的节点或网络区域不必处理与其无关的数据。

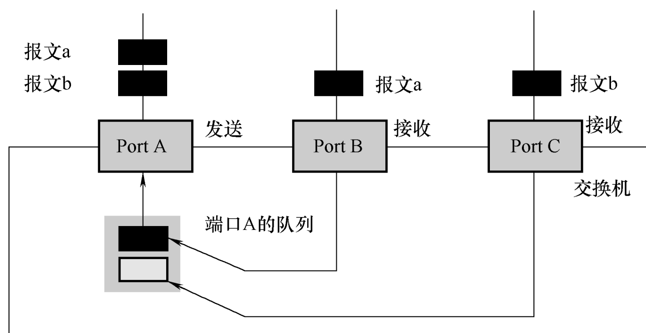


图 9-7 PROFINET 上的存储转发

8. PROFINET 设备的 IP 地址和子网掩码

PROFINET 设备可以在 PROFINET 网络进行数据通信，需要对网络节点进行寻址，因此，PROFINET 设备有网络上惟一的 IP 地址。IP 地址包括：子网网络地址和设备节点地址。为区分 PROFINET 设备所在子网，使用子网掩码来映射网络地址和 PROFINET 设备地址。

9. DCOM

DCOM（分布式 COM）是 COM 标准的扩展，用于超越设备限制的远程对象通信。DCOM 在 RPC 上设置了一个协议，而该协议使用 TCP/IP 作为基础。利用对时间不敏感的 DCOM 数据（如过程数据、诊断数据、组态等）交换 PROFINET CBA 设备。

10. ERTEC 增强的实时以太网控制器

11. MPI

多点接口（MPI）表示 SIMATIC S7 的编程设备接口。它允许一个或多个 CPU 同时操作多个节点。通过其惟一的地址（MPI 地址）标识每个节点。

12. OLE

OLE 即对象连接与嵌入（Object Linking and Embedding）。

13. OPC

OPC 即用于过程控制的对象连接与嵌入（OLE for Process Control）。

14. OPC 客户机

OPC 客户机是通过 OPC 接口访问过程数据的用户程序。要访问过程数据，还必须通过 OPC 服务器。

15. OPC 服务器

OPC 服务器为 OPC 客户机提供了各种功能，客户机可利用这些功能通过工业以太网进行通信。

16. PROFIBUS-DP

使用 DP 协议且符合 EN 50170 的 PROFIBUS。

17. PROFINET IO

作为 PROFINET 的一部分，PROFINET IO 是用于实现模块化、分布式应用的通信概念。

18. PROFINET IO 控制器

用于对连接的 IO 设备进行寻址的设备。这意味着 IO 控制器将与分配的现场设备交换输入和输出信号。IO 控制器通常是运行自动化程序的控制器。

19. 主站

如果主站拥有令牌，则该主站就可以将数据发送到其他节点并请求其他节点（活动节点）的数据。

20. 从站

从站只能在主站请求与其交换数据后才交换数据。

9.5.4　PROFINET 组网拓扑和子网

PROFINET 组网拓扑较为灵活，可以采用星形、树形和总线型拓扑。

1. 星形拓扑

星形结构中的单个 PROFINET 设备发生故障不会自动导致整个网络发生故障，仅当交换机发生故障时部分通信网络才会发生故障。组织 PROFINET 网络时，PROFINET 拓扑结构具有很灵活的结构。一个星形结构的 PROFINET 网络如图 9-8 所示。

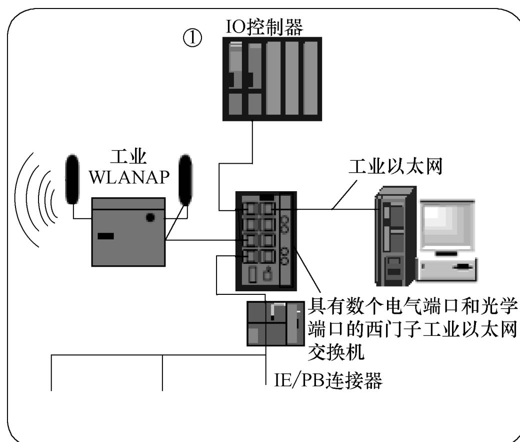


图 9-8　一个星形结构的 PROFINET 网络

2. 树形拓扑

将若干星形结构互联，则可获得树形网络拓扑。

3. 总线型拓扑

网络中所有通信节点串联在一起就成为总线型拓扑。总线网络结构需要的接线工作最少。

4. 子网

通过交换机连接的所有设备位于同一网络中，该网络称为子网。子网中的所有设备之间可以直接通信。同一子网中的所有设备具有相同的子网掩码。

9.5.5　PROFINET 网络接口的技术规范

PROFINET 网络接口的技术规范内容如下：

1. 电气连接的情况

使用 RJ-45 连接器（ISO/IEC 61754-24）；采用 100Base-TX 网络结构，使用超 5 类非屏蔽双绞线，遵循 IEC 61158 标准；传输速率/模式为 100Mbit/s 全双工；网段最大覆盖范围为 100m。一种 RJ-45 插拔式连接器如图 9-9 所示。

2. 光纤连接的情况

1）使用 SCRJ-45（SCRJ 插拔式连接器）（ISO/IEC 61754-24）；采用 100Base-FX 网络结构，适用于 POF、HCS 或多模玻璃光纤，遵循 IEC 60793-2 标准；传输速率/模式为 100Mbit/s 全双工；网段最大覆盖范围为 50m。

2）使用 SCRJ-45（SCRJ 插拔式连接器）（ISO/IEC 61754-24）；采用 100Base-FX 网络结构，适用于 PCF 覆膜玻璃纤维，遵循 IEC 60793-2 标准；传输速率/模式为 100Mbit/s/全双工；网段最大覆盖范围为 100m。

一种 SCRJ 插拔式连接器如图 9-10 所示。

3. M12 插拔式连接器

一种工业以太网中使用的 M12 插拔式连接器如图 9-11 所示。



图 9-9　一种 RJ-45 插拔式连接器

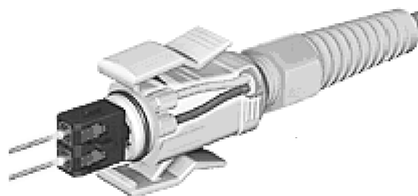


图 9-10　一种 SCRJ 插拔式连接器

以上的 RJ-45 插拔式连接器、SCRJ 插拔式连接器都是具有 IP67 防护等级的产品。RJ-45 插拔式连接器用于双绞线的连接；SCRJ 插拔式连接器适用于 POF、HCS 或多模玻璃光纤的连接；这里的 M12 插拔式连接器是 D 编码的 4 位连接器。

4. BFOC

使用 BFOC（卡口式光纤连接器）（ISO/IEC 60874-10）；单模光纤，遵循 ISO/IEC 9314-4 标准；传输速率/模式为 100Mbit/s/全双工；网段最大覆盖范围为 26km 或 3000m。

BFOC 即内置双电口光纤收发器，如图 9-12 所示。

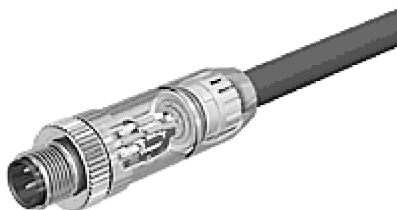


图 9-11　一种 M12 插拔式连接器



图 9-12　BFOC

5. 使用射频频段进行无线连接的情况

在 2.4GHz 的频率下，使用 IEEE 802.11 协议序列。

9.5.6　优化的 PROFINET 网络

在管理层的信息网络和 PROFINET 系统之间连接一个路由器可以优化 PROFINET 系统的性能，如图 9-13 所示。

在 PROFINET 网络中，通过集成 PROFINET 接口，分布式现场设备可以直接连接到 PROFINET 上。可以通过代理服务器（Proxy）将 PROFIBUS、INTERBUS 等现场总线集成到 PROFINET 中，如图 9-14 所示。可以通过同样的方式，使用一个代理服务器将现场总线网络接入到 PROFINET 中。

PROFINET 能够实现与现场总线的无缝集成。PROFINET 可以满足各种从高性能到等时同步的实时通信，并已经成为现场总线国际标准 IEC61158 的第 10 类型。PROFINET 由 PROFIBUS 国际组织（PROFIBUS International，PI）推出，是基于工业以太网技术的自动化总线标

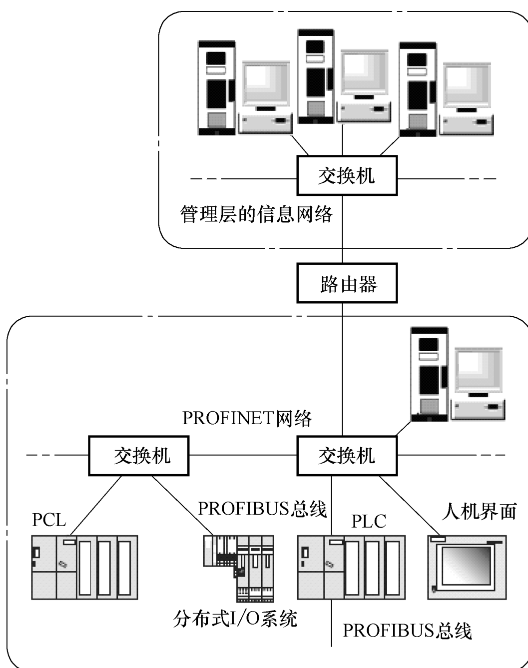


图 9-13　优化的 PROFINET 网络

准。PROFINET 完全兼容工业以太网和现有现场总线（如 PROFIBUS）技术。

PROFINET 提出了两种工业以太网的通信机制，采用 TCP/IP 通道来实现非实时数据的传输。如用于设备参数、组态和读取诊断数据的传输。而实时数据的传输是将 OSI 模型的第 3 层和第 4 层进行旁路，实现实时数据通道，传输的实时数据存放在实时堆栈上，实现传输时间的确定性。PROFINET 定义了报文的优先权，规定了 7 级的优先级。其中最高级用于硬实时数据的传输。

PROFINET 包括 8 个主要功能模块，依次为实时通信、分布式现场设备、运动控制、分布式自动化、网络安装、IT 标准和网络安全、故障安全和过程自动化。结构示意如图 9-15 所示。

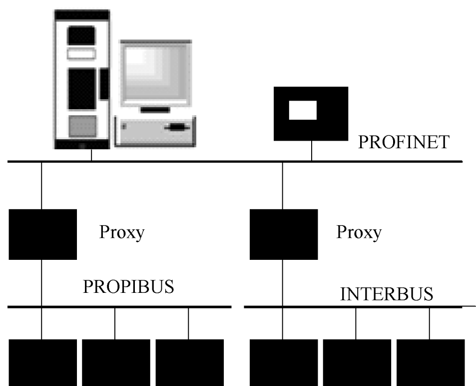


图 9-14　通过代理设备将 PROFIBUS、INTERBUS 集成到 PROFINET 中



图 9-15　PROFINET 结构

PROFINET 支持 3 种通信方式：

1. TCP/IP 标准通信

PROFINET 基于工业以太网技术，使用 TCP/IP 和 IT 标准。TCP/IP 是 IT 领域关于通信协议方面事实上的标准，其响应时间大概在 100ms 量级，对于工厂控制级应用来说，这个响应时间足够。

2. 实时（RT）通信

对于传感器和执行器设备间数据交换，系统对响应时间要求更为严格，需 5 ~ 10ms。对于基于 TCP/IP 的工业以太网技术，使用标准通信栈来处理过程数据包需要很可观的时间，因此，PROFINET 提供一个优化的、基于以太网第 2 层（Layer2）的实时通信通道，通过该通道，极大地减少了数据在通信栈中的处理时间。因此 PROFINET 获得等同甚至超过传统现场总线系统的实时性能。

3. 同步实时（IRT）通信

在现场级通信中，对通信实时性要求最高的是运动控制。伺服运动控制对通信网络提出极高要求，在 100 个节点下，其响应时间要小于 1ms，抖动误差要小于 1μs，以保证及时、确定的响应。

9.5.7　PROFINET 技术应用实例

1. 一个 PROFINET 应用系统的系统架构

一个 PROFINET 应用系统的系统架构如图 9-16 所示。

企业管理层以太网中的管理计算机可以直接访问现场级设备，如 PC—交换机 1—路由器—交换机 2—S7-300 CPU319-3PN/DP（S7-300 的 CPU319-3PN/DPPLC）。

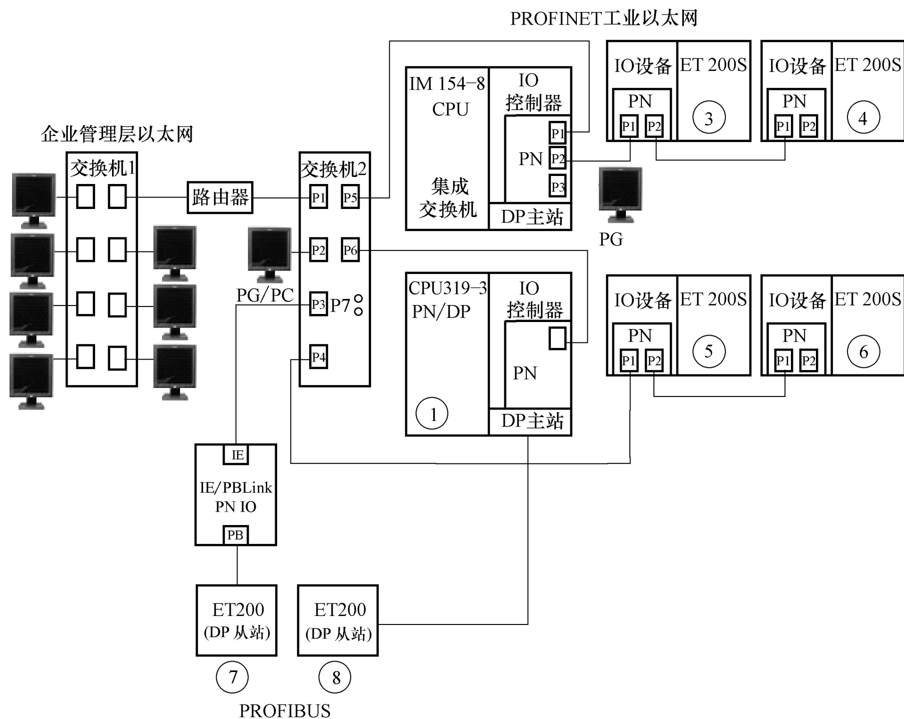


图 9-16　PROFINET 应用系统的系统架构

自动化系统和现场级的连接可以从现场级的 PC 访问 PROFINET 网络的其他区域。如从 PC—集成交换机 IM 154-8CPU—交换机 2—集成交换机 IO 设备 ET 200S（ET 200S 分布式 I/O 模块）集成交换机 IM 154-8 CPU 的 IO 控制器直接控制 PROFINET 网络和 PROFIBUS 总线上的设备。CPU 319-3PN/DP 可以是 IO 控制器，同时又是 DP 主站。

2. PROFINET 技术在某生产控制系统中的应用

某生产控制系统如图 9-17 所示。

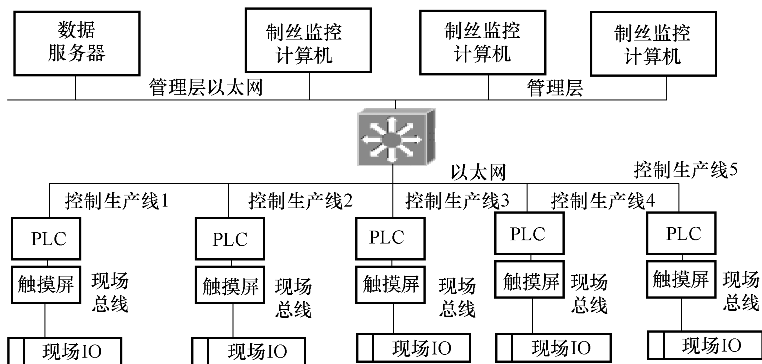


图 9-17　某生产控制系统

原控制系统各个工艺段由触摸屏、现场站组成控制系统，现场总线将各部件连接现场层与监控管理层通过以太网交换机进行连接。在生产现场，各工艺段负责本工艺段的控制，根据生产工艺要求，由现场总线传送控制指令到达现场站，完成对现场执行器件的控制，同时采集现场传感器的信号。

交换机通过以太网将现场层与监控管理层连接。服务器采集现场的生产信息，生成相应报表

监控文件。由于生产规模的不断扩大，而且要求不断地改进生产工艺，这就要求不断地改进控制系统。但由于原控制系统无法满足不断地进行生产工艺改进和生产规模地扩大，就要重新设计新的控制系统。

应用 PROFINET 实时以太网技术构建新的控制系统。使用交换机构建冗余光纤环网，各工艺段的电气设备不再按物理划分，全部就近接入工业以太网，现场操作员终端通过与所有控制段通信，实现对相关控制段设备的授权监控，同时还通过与生产管理层连接，直接从生产管理层获得管理指令数据，并将相关生产段的生产信息传递给生产管理层。数据服务器同样通过以太网接入工业以太网，采集相关数据。无线以太网交换机可以使用户的无线设备便捷地连入网络进行监控。应用 PROFINET 网络技术构建新控制系统如图 9-18 所示。

传统的现场总线控制系统，要求同一工艺段的电气器件必须通过总线电缆直接相连。工业以太网户无此要求，只要就近将电气器件接入交换机，在组态时就可完成逻辑结构的构建。

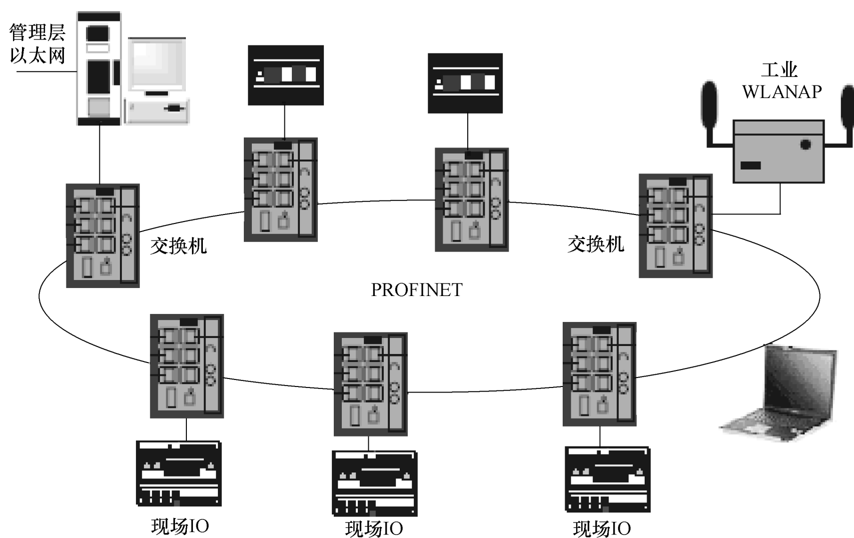


图 9-18　各工艺段的逻辑结构应用 PROFINET 网络技术构建新控制系统

9.6　EtherCAT

EtherCAT 是由德国自动化控制公司 Beckhoff 开发的。EtherCAT 使用标准的以太网物理层和常规的以太网卡，媒体可为双绞线或光纤。

EtherCAT 技术不仅与以太网完全兼容，该协议可与其他提供各种服务的以太网协议并存，标准的以太网设备可通过交换机端子连接至一个 EtherCAT 系统，该端子并不会影响循环时间。配备传统现场总线接口的设备可通过 EtherCAT 现场总线主站端子的连接集成到网络中。

EtherCAT 的以太网协议帧中包含了网络的各个模块的数据。EtherCAT 网络中数据的传输采用移位同步的方法进行，即在网络的模块中得到其相应地址数据的同时，数据帧可以传送到下一个设备，相当于数据帧通过一个模块输出相应的数据后，马上转入了下一个模块。由于这种数据帧的传送从一个设备到另一个设备延迟时间仅为微秒级，在网络段的最后一个模块结束了整个数据传输的工作，形成了一个逻辑和物理环形结构。所有传输数据与以太网的协议相兼容，同时采用双工传输。

EtherCAT 支持多种传输介质。采用不同的传输电缆可以最大限度地发挥布线的灵活性。灵

活而价格低廉的标准以太网插接电缆可通过以太网模式（100Base-TX）或通过 E 总线来传输信号。快速以太网的物理特性可以使设备之间的距离达到 100m，而 E-bus 只能保障 10m 的间距。快速以太网或 E-bus 可以按照距离要求进行选择。EtherCAT 系统最多可容纳 65535 个设备，因此整个网络规模几乎是无限制的。

9.6.1　EtherCAT 系统的结构

EtherCAT 系统适合小数据量通信，系统实施成本低，在 I/O 级可以方便地实现与 Internet 的通信。使用 EtherCAT 技术，不需要接收以太网数据包，将其解码，之后再将过程数据复制到设备上去。EtherCAT 采用主/从式构架。EtherCAT 主设备由带有两个以太网端口的实时控制器构成。

采用主/从式构架的 EtherCAT 网络如图 9-19 所示。

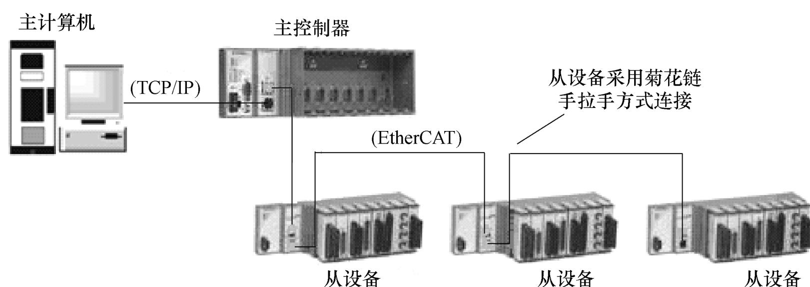


图 9-19　EtherCAT 采用主/从式构架

EtherCAT 从站设备在报文经过该节点时，读取相应的编址数据，在报文经过设备节点时，将输入数据插入报文中。EtherCAT 协议可以包括几个 EtherCAT 报文。从站之间的数据可以用广播方式和多播方式传输。

形象地描述 EtherCAT 应用系统中数据传输的过程。设想以太网的数据帧就像行驶中的火车，EtherCAT 报文是每节火车车厢，需要传输和处理的数据是车厢内的乘客，数据可以被提取出来或插入到合适的从设备中。这辆动态的火车不停止地经过穿越所有从设备，在末端从设备处返回反向重新穿越所有从设备，如图 9-20 所示。

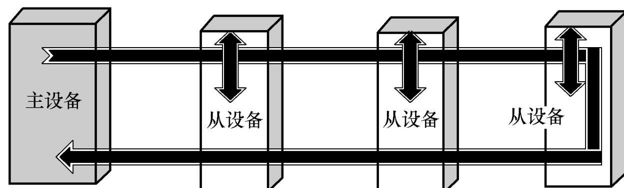


图 9-20　EtherCAT 数据传输

当第 1 台从设备收到主设备发出的以太网数据包后，自动开始将数据包发送到第 2 台从设备，这个处理过程对数据包的读写延迟仅为数纳秒。假设有 K 台从设备，对于非 EtherCAT 的网络，需要发送 50 个不同的数据包；而对于 EtherCAT，只需发送一个的数据包，这个数据包包含所有从设备的数据。如果所有从设备需要接收相同的数据，那么只需要发送一个短数据包，所有从设备接收数据包的同一部分便可获得该数据，从而优化了数据传输速度及带宽。

在 EtherCAT 网络的主从式结构中，主站 PC 直接采用以太网网卡，如 100Base-TX 以太网网卡，可用专用模块作为从站。系统控制周期由主站发起，主站送发出下行电报，电报的最大数据量为 1498B。下行电报依次通过所有的从站设备，从站对经过的数据帧进行分析，根据报文头中

的命令读取数据或将要送出的数据写入到报文中。数据帧访问到网段上逻辑链路最后一个从站，该从站将经过处理的数据帧作为上行电报再发送给主站。主站收到这样一个上行电报后，处理返回数据，在网段上分布有从站设备的逻辑链路上所有从站和主站之间的一次通信过程结束。数据的传输采用移位同步的方法进行，即在网络的从设备中得到其相应地址数据的同时，数据帧可以传送到下一个从设备，相当于数据帧通过一个从设备时输出相应的数据后，马上转入下一个从设备。在网段的最后一个从设备节点处结束了整个数据传输的工作，形成了一个逻辑和物理环形结构。所有传输数据与以太网的协议相兼容，同时采用双工传输，提高了传输的效率。

9.6.2　EtherCAT 网络中的主站、从站和通信协议模型

1. EtherCAT 网络中的主站和从站

EtherCAT 网络中主站设备需要在每个网络周期中为各个节点处理、发送和接收帧。在通常情况下，每周期仅需要一个或两个帧就可以完成网段上所有节点的数据通信，主站除了在每个网络周期中处理各节点的帧发送和接收工作外，同时还可以处理应用程序。

EtherCAT 从站设备使用一个价格低廉的从站控制器芯片（ESC）。从站不需要微处理器就可以实现 EtherCAT 通信。

2. EtherCAT 协议标准帧和通信协议模型

2005 年 2 月，EtherCAT 通过 96% 的 IEC 会员投票通过成为 IEC 规范-IEC/PAS 62407，ISO 已经将 EtherCAT 纳入 ISO 15745 标准。EtherCAT 协议扩展了 IEEE 802.3 以太网标准，使得数据传输中具有可预测性定时及高准确度同步等特点。这个开放性标准作为 IEC 61158 的组成部分。

EtherCAT 协议标准帧结构如图 9-21 所示。

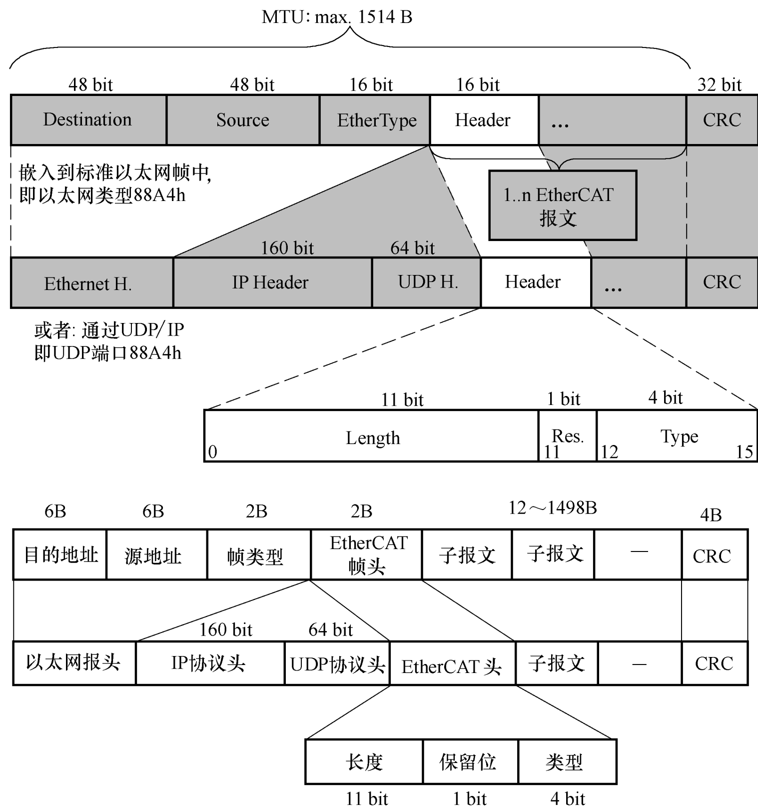


图 9-21　EtherCAT 协议标准帧结构

EtherCAT 帧结构的含义见表 9-5，子报文结构参量含义见表 9-6。

表 9-5　EtherCAT 帧结构的含义

名称	含义
目的地址	接收站点的 MAC 地址
源地址	发送站点的 MAC 地址
帧类型	0x88A4
EtherCAT 头:长度	数据区长度,即子报文长度和
EtherCAT 头:类型	1 代表与从站通信,其余保留
CRC	循环冗余校验

表 9-6　子报文结构参量含义

名称	含义
命令	寻址方式与读写方式
索引号	帧编码代号
子报文地址	从站地址
长度	报文数据区长度
M	此报文后是否还有报文
状态位	中断到来标志
数据区	子报文数据结构,用户定义
WKC	工作计数器,报文寻址次数

EtherCAT 的通信协议模型如图 9-22 所示。EtherCAT 网络中组态数据或参数的传输是在一个确定的时间中通过一个专用的服务通道进行的。

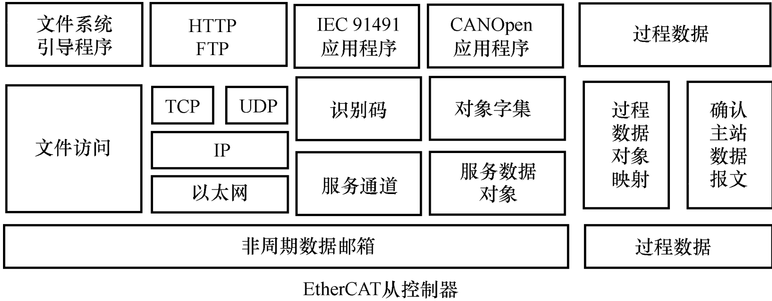


图 9-22　EtherCAT 通信协议模型

EtherCAT 协议直接以标准以太网的帧格式传输数据，当主控制器和从设备处于同一子网时，EtherCAT 协议就替换以太网帧中的 IP。数据以过程数据对象（PDO）的形式在主从设备之间传输。每个 PDO 都包含单个或多个从设备的地址，这种数据加地址的结构（附带用于校验的传输计数位）组成了 EtherCAT 的报文。每个 Ethernet 帧可能包含数个报文，而一个控制周期中可能需要多帧来传送所需的所有报文。

EtherCAT 子报文结构如图 9-23 所示。

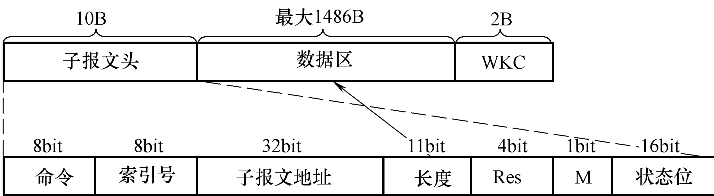


图 9-23　EtherCAT 子报文结构

9. 6. 3　EtherCAT 网络拓扑结构和传输介质

1. EtherCAT 网络拓扑

EtherCAT 网络支持总线型、树形、星形等拓扑结构。使用总线型拓扑组织的系统如图 9-24 所示，使用超五类线缆连接成菊花链结构，如图 9-25 所示。

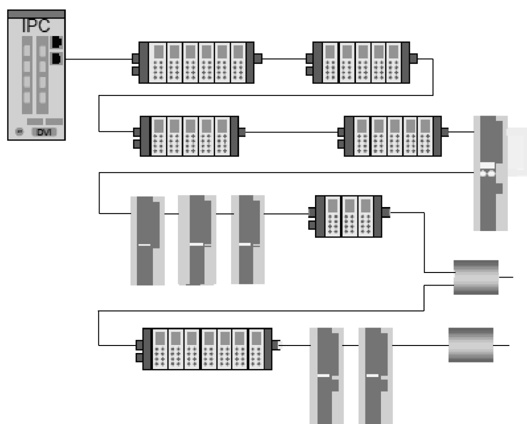


图 9-24　使用总线型拓扑组织的系统

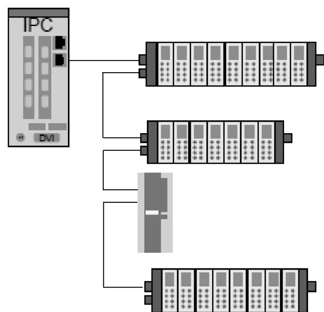


图 9-25　菊花链结构

树形拓扑组织系统如图 9-26 所示。

2. EtherCAT 技术支持的传输介质

EtherCAT 支持多种传输介质。采用不同的传输电缆可以最大限度地发挥布线的灵活性。灵活而价格低廉的标准以太网插接电缆可通过以太网模式（100Base-TX）或通过 E 总线来传输信号。快速以太网的物理特性可以使设备之间的距离达到 100m，而 E-bus 只能保障 10m 的间距。快速以太网或 E-bus 可以按照距离要求进行选择。EtherCAT 系统最多可容纳 65535 个设备，因此整个网络规模几乎是无限制的。

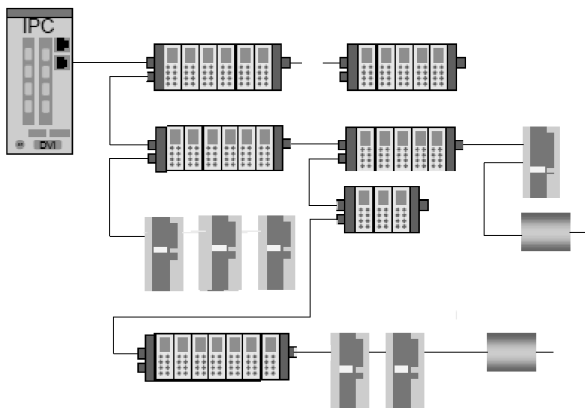


图 9-26　树形拓扑组织系统

9.6.4　EtherCAT 技术特点

EtherCAT 的主要技术特点如下：

1）EtherCAT 是直达 I/O 层的实时以太网，无网关延时。

2）传输速率：2 × 100Mbit/s（全双工模式）。

3）每个从站对过程数据的数据量大小无限制。

4）若网络中全部为 EtherCAT 设备，则无需交换机。

5）和管理层信息域以太网兼容。

6）可使用标准交换机。

7）通过一个交换机，一个 MAC 地址可以访问多达 65535 个节点（网段寻址）。

8）可以计算出任何节点之间的传输延时。

9）EtherCAT 使用 IEEE 802.3 以太网标准帧。

10）对 TCP/IP 完全透明。

11）Internet 技术可以透明移植到 EtherCAT 网中，如超文本传输协议（HTTP）、文件传输协议（FTP）等。

12）所有以太网设备都可以连接到交换机端口。

13）通过标准浏览器可以将数据直接从网络服务器数据读出和写入服务器。

14）交换机端口支持任何以太网协议；交换机端口可以连接以太网设备或网络；以太网报文被插入 EtherCAT 帧中；EtherCAT 直接实现与以太网的通信。

15）虚拟以太网交换机可以转发任何以太网帧；网段的内部与外部的以太网帧同样都被转发。

9.7 EPA

9.7.1 EPA 标准

1. EPA 标准概述

EPA（Ethernet for Plant Automation，以太网工厂自动化）是由中控科技集团、浙江大学联合牵头，中科院沈阳自动化研究所、大连理工大学、重庆邮电大学、清华大学、上海工业自动化仪表研究所和北京华控等单位联合制定的我国第一个拥有自主知识产权的工业以太网国家标准（GB/T 20171—2006）。

IEC 于 2007 年 10 月发布实时以太网国际标准应用行规 IEC 61784-2、现场总线国际标准 IEC 61158。这两个标准已经正式成为国际标准。其中，EPA 标准协议作为第 14 类型（TYPE14）列入了 IEC 61158，而 EPA 的应用技术则作为 CPF14（Common Profile Family14，公共行规簇 14）列入了实时以太网国际标准 IEC 61784-2。

EPA 标准是新一代现场总线标准（用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构与通信规范），并成为我国第一个拥有自主知识产权并被 IEC 认可的工业自动化领域国际标准。

国内数家高校、中科院下属研究所和浙大中控等单位，协同解决和攻克了 EPA 工业实时以太网的以下关键性技术：确定性通信技术；实时通信技术；扩展性与大规模系统设计激活逻辑隔离式微网段技术；冗余总线供电技术；网络安全技术；本质安全技术；网络高可靠性与高可用性技术；远距离传输技术；互通信、互操作技术；功能安全通信技术，形成了具有自主知识产权的 EPA 核心技术。这一成果改变了我国在现场总线领域和工业以太网长期处于跟踪研究状态、核心技术始终掌握在国外跨国企业手中的被动局面，使我国在实时以太网技术发展中处于平等竞争的水平。

2. EPA 系统的确定性通信

尽管交换式以太网技术、全双工模式工作以及规定的优先级技术可以在一定程度上避免碰撞和降低碰撞概率，但存在一定的局限性。

以太网交换机存在着数据发送和接收的“广播风暴”问题，在工业数据通信网络中使用较普遍的广播式发送实时数据的方式，不可避免地会产生碰撞；还有以太网交换机工作采用了存储转发机制，也使数据通信具有了因排队和延迟造成的不确定性。当交换机的某一个端口接收到多个端口发送来的报文，需要将这些报文置于缓存进行排队缓冲等待转发，这种工作方式不可避免地造成数据传输的不确定性。

在 EPA 控制系统中，根据组态方案，数据的传送严格按照确定的时序进行；另外，网络负荷水平较稳定。EPA 控制系统中，控制现场被分为若干个控制区域，每个区域之间通过一个网桥进行互联，即不同控制区域之间的数据传输通过网桥进行转发，在一个控制区域上，任何一个 EPA 设备按照组态顺序分时发送数据，避免了碰撞，保证了 EPA 控制系统内各节点设备通信的确定性和实时性。

3. 以太网一网到底

EPA 技术采用分段化系统结构和确定性通信调度控制策略，解决了以太网通信的不确定性问题，使以太网、无线局域网、蓝牙网络等广泛应用于工业企业管理层、过程监控层网络的技术直接应用于变送器、执行机构、远程 I/O、现场控制器等现场设备间的通信。采用 EPA 网络，可以实现控制系统的通信网络使用以太网一网到底。

EPA 网络控制系统的通信网络架构从管理层到控制层都采用了基于以太网技术的统一。采用 EPA 技术，不仅可以实现管理层级的横向集成，同时也能实现管理层级到控制层级的无缝集成。将管理域和控制域连同起来，大幅提高控制系统的性能。基于 EPA 的现场智能设备和应用程序尽管来自于不同的厂家，都能流畅地进行互通信和互操作。

由于基于以太网技术，EPA 网络控制系统可以方便地接入 Internet，在远程对 EPA 网络控制系统进行有效的监控。

EPA 还具有与传统的集散控制系统、PLC 控制系统和基于 EPA 的现场总线控制系统实现无缝数据集成。

9.7.2　EPA 通信协议和系统结构

1. EPA 通信协议

EPA 系统的通信网络使用的通信模型层级结构与 OSI 模型相类似，EPA 通信模型层级结构中在 OSI 模型的应用层之上添加了用户层；在应用层除了使用简单网络管理协议、文件传输协议、动态主机组态协议等常用通信协议之外，加入了 EPA 应用协议；并在数据链路层添加了 EPA 通信调度管理实体，如图 9-27 所示。

EPA 通信协议模型如图 9-28 所示。

ISO各层	EPA各层
	(用户层)用户应用进程
应用层	HTTP、FTP、DHCP、SNTP、SNMP等 EPA应用层
表示层 会话层	未使用
传输层	TCP/UDP
网络层	IP
数据链路层 物理层	EPA通信调度管理实体 ISO/IEC 8802-3、IEEE 802.11、IEEE 802.15

图 9-27　EPA 和 OSI 模型的比较

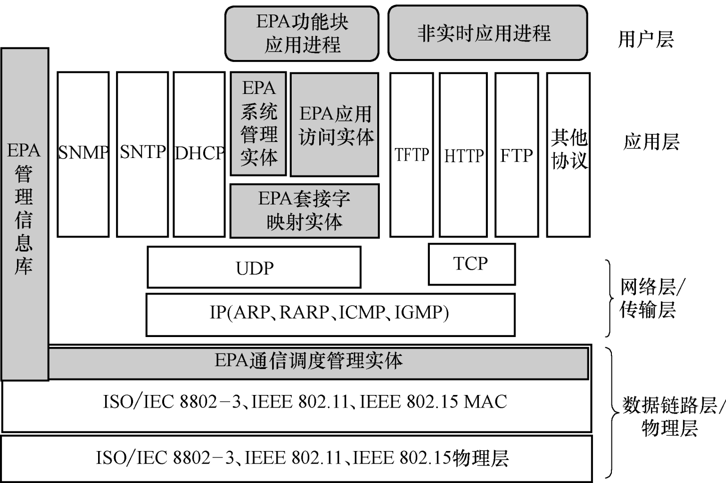


图 9-28　EPA 通信协议模型

2. EPA 系统结构

EPA 监控系统是一种分布式系统，它通过 ISO/IEC 8802-3、IEEE 802.11、IEEE 802.15 等协

议定义的网络，将分布在现场的设备、子系统连接起来，协同完成生产现场监控。

EPA 系统结构提供了组建一个高效能控制系统的架构，描述不同设备的连接方式、通信方式和交换数据的规则以及组态的确定。

EPA 系统中的通信网络也分为监控管理层（L2 网段）和现场设备层（L1 网段），处于现场设备层的 L1 网段在物理接口和线缆特性上要符合生产现场应用要求。监控管理层网络和现场设备层网络均可以进一步细分成若干个微网段。每个微网段通过连接几台 EPA 现场设备组成一个独立的控制域，统一控制域内的 EPA 设备可以方便地进行数据通信，实现特定的测量功能和控制功能。不同的微网段通过网桥进行连接，EPA 系统中的微网段可以由以太网、无线局域网或蓝牙 3 种类型网络中的一种构成，也可以由其中的两种网络组成。当然，一个微网段可以同时包括以上 3 种子网，但不同的子网需要使用网关互联。

EPA 控制系统采用微网段对各个分散的控制域进行逻辑分割，形成“总体分散、局部集中”的控制系统结构，如图 9-29 所示。

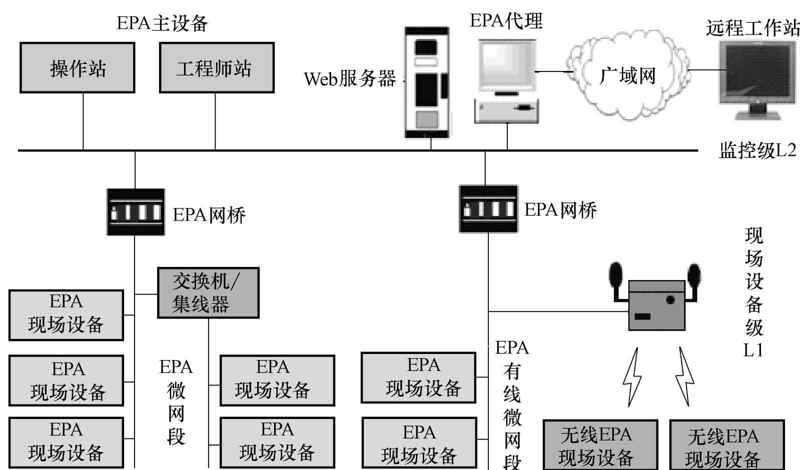


图 9-29 EPA 控制系统结构

3. EPA 控制系统中的设备

EPA 控制系统中的设备有 EPA 主设备、EPA 现场设备、EPA 网桥、EPA 代理、EPA 无线接入设备等。

（1）EPA 主设备

EPA 主设备是过程监控级网段上的设备，一般指 EPA 控制系统中的组态、监控设备或人机交互平台，如工程师站、操作站等。EPA 主设备在系统中有惟一的 IP 地址。

（2）EPA 现场设备

EPA 现场设备是指处于工业现场环境的设备：传感器、变送器、执行器、开关、数据采集器、现场控制器等。EPA 现场设备的 IP 地址也必须在系统中是惟一的。

（3）EPA 网桥

EPA 网桥是连接两个微网段或实现一个微网段和监控级网络连接的设备。一个 EPA 网桥有两个或两个以上的通信接口，分别连接两个微网段或将一个微网和监控级网络进行连接。

EPA 网桥功能：通信隔离、报文转发与控制。

（4）无线 EPA 接入设备

无线 EPA 接入设备由一个无线通信接口（WLAN 通信接口或蓝牙通信接口）和一个以太网通信接口构成，用于连接无线网络与以太网。

（5）无线 EPA 现场设备

无线 EPA 现场设备具有至少一个无线通信接口（WLAN 通信接口或蓝牙通信接口），并具有 EPA 通信实体，包含至少一个功能块实例。

（6）EPA 代理

EPA 代理作为一个可选设备，作用是连接 EPA 网络与其他网络，并对远程访问和数据交换进行安全控制与管理。

9.7.3　互通信与互操作

工业数据通信网络不仅要解决不同实体的互联和信号的互通，还要解决不同实体之间数据信息的互通信问题，在实现了互通信的基础上就可以实现不同子系统的互操作。

信号的互通是指两个需要互相通信的设备共同采用规定的通信介质、信号类型、信号电平、电量信号的输入/输出参数满足相同的物理标准，再共同遵守统一的数据链路层协议，不同的设备就可以通过物理网络相连实现信号的双向传输。

在实现设备互连能够进行信号互通的基础上，如果采用统一的高层协议，不同设备之间就可以互相理解和识别通信对方传输的数据信息的含义和功能，实现互操作。

EPA 标准为用户层应用程序定义了应用层服务与协议规范，如系统管理服务、变量访问服务、事件管理服务等规范。EPA 标准对于 OSI 通信模型中的会话层、表示层进行忽略，降低设备的通信处理负荷，在应用层直接定义与 TCP/IP 的接口。

EPA 标准采用 XML（eXtensible Markup Language，可扩展标记语言）作为 EPA 设备描述语言，规定了设备、功能块和通信接口的描述语言。不同厂商的 EPA 设备之间使用这种统一的描述和解读方式来实现通信设备之间对数据信息的理解，并实现互操作。

9.7.4　开放性与安全

1. 开放性

EPA 规范及标准与以太网的 IEEE 802.3、IEEE 802.1p&q、IEEE 802.1D、IEEE 802.11、IEEE 802.15 协议完全兼容，包括和以太网传输层中面向连接的 TCP 和不面向连接的 UDP，以及网络层的 IP 完全兼容。对于很多数据量小的指令性数据采用 UDP 传输 EPA 协议报文，可以减少协议处理时间，同样能够提高报文传输的实时性。

EPA 系统是在工业环境中运行，因此 EPA 标准增加了媒体接口选择规范与线缆安装导则。

信息网络中的通信介质：对绞电缆、光纤和同轴电缆可以直接应用在 EPA 系统中，但如果应用环境有特殊的要求，则应该选用满足现场环境的通信介质。

EPA 系统除了非常好的与以太网技术兼容外，还兼容其他几种不同的通信技术，如无线局域网技术、蓝牙网络技术，当然这是在基于兼容诸如 FTP、HTTP、SOAP，以及 ModBus、PROFINET、Ethernet/IP 的基础上来实现的。所以，以太网技术、无线以太网技术以及短距低功耗的蓝牙网络技术中的软硬件资源都可以在 EPA 系统中被充分地应用。

2. 分层的安全策略

EPA 系统从管理层、过程监控层和现场设备层 3 个层次，采用分层化的网络安全管理措施来保证系统的安全运行。具体的方法是：EPA 现场设备在处理报文时，使用网络安全管理功能模块，对接收到的任何报文进行以下方面的检测：访问权限是否具备、访问密码是否正确，EPA 现场设备仅处理合法的报文，对于通过检测认定不合格的报文则丢弃。

在管理层，对于来自于互联网上的远程访问，采用 EPA 代理服务器以及多种信息网络安全监控措施，防止非法用户的远程访问。

9.8　ModBus/TCP

9.8.1　ModBus/TCP 工业以太网协议概述

ModBus/TCP 是由 ModBus 组织和 IDA（Interface for Distributed Automation，分布式自动化接口）集团联手开发的基于 Ethernet TCP/IP 和 Web 互联网技术的实时以太网。ModBus/TCP 是运行在 TCP/IP 上的 ModBus 报文传输协议。通过此协议，控制器相互之间通过网络（例如以太网）和其他设备进行通信。

ModBus/TCP 工业以太网协议是 1999 年开发的 ModBus 协议的另一版本，允许用户通过以太网访问设备。

ModBus/TCP 的应用层协议是由 Modicon 公司为其 PLC 设计的通信协议 ModBus，因其具有开放性及透明性而得到工业领域的广泛支持，现已成为工业标准，ModBus/TCP 的传输层协议 TCP 和网络层协议 IP 是 IT 行业的标准，具有连接不同网络的能力，能适应几乎所有的底层通信技术。ModBus/TCP 采用以太网的物理层和数据链路层，可使用通用的网络部件。我国已把 ModBus/TCP 列为工业网络的标准。早在 2004 年 1 月，法国召开的 SC65C 工作组会议中就将 ModBus/TCP 列入 IEC 标准。

ModBus/TCP 用简单的方式将 ModBus 帧嵌入到 TCP 帧。ModBus/TCP 网络采用分级分布方式组织系统，管理级采用 TCP/IP 标准，控制级包括有可编程序控制器、工业计算机、控制器和网关等，基于 ModBus TCP/IP 工作，完成特定的监控功能。现场级采用基于 ModBus 协议或 Ethernet 协议的设备和 I/O 装置。

9.8.2　ModBus/TCP 数据帧

ModBus/TCP 数据帧包含报文头、功能代码和数据 3 个部分，如图 9-30 所示。

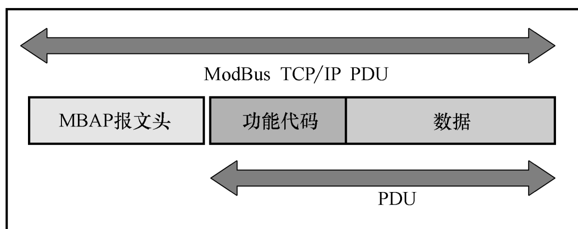


图 9-30　ModBus/TCP 数据帧格式

MBAP（ModBus Application Protocol，ModBus 应用协议）报文头占有 7B，分成传输表示、协议标志、长度和单元标志 4 个域，每个域分布属性和描述见表 9-7。

表 9-7　MBAP 报文头

域	长度/B	描　述	客户端	服务器端
传输标志	2	标志某个 ModBus 询问/应答的传输	由客户端生成	应答时复制该值
协议标志	2	0 = ModBus 协议 1 = UNI-TE 协议	由客户端生成	应答时复制该值
长度	2	后续字节计数	由客户端生成	应答时由服务器端重新生成
单元标志	1	定义和目的节点连接的设备	由客户端生成	应答时复制该值

9.8.3　ModBus/TCP 网络的体系结构及通信

1. ModBus/TCP 网络的体系结构

ModBus/TCP 的数据链路层仍然使用 CSMA/CD 媒质访问控制机制，到了应用层则采用 Mod-

Bus 主/从式通信协议，该协议使数据通信具有了确定性。ModBus/TCP 网络使用主/从网络结构进行工作，网络中的主节点负责控制网络的通信，并用轮询的方式对所有的从节点进行顺序“询问”。网络中的客户端发出的每个请求报文均有确定的应答，任意时刻网络上只有一个节点发送数据，于是避免了访问冲突，降低了在较大网络负荷时数据传输的通信延时。

服务器与现场设备之间的通信包括服务器端和客户端之间的通信、客户端和现场设备之间的通信。在进行通信的过程中，当服务器端发送请求报文时，可建立一个发送缓冲区，依次将从站地址、功能码、数据起始地址、数据、冗余校验等信息通过缓冲区构建一帧 ModBus 数据。再往后，将此帧数据发送至客户端，再由客户端通过 ModBus 协议转发至下位 ModBus 现场设备。服务器将数据帧发送到客户端的过程中使用 TCP/IP 通信协议进行工作。在服务器向客户端返回应答报文时，客户端要上行传送数据，则通过 TCP/IP 将数据传至服务器端，在服务器端也设置了接收缓冲区，进行数据帧的处理。

服务器和客户机的通信过程是通过客户端程序和服务器端程序基于 TCP/IP 通信协议进行的。ModBus/TCP 网络通信采用 TCP 的可靠连接方式，通信发起和进行过程中的 Socket 套接字是基于 TCP 的流式套接字，服务器对每个客户的请求均用一个独立的线程来处理，这样可以提高通信效率，提高处理连接队列中待处理的服务请求的能力。

ModBus/TCP 客户端与建立目标设备用 Connect（）命令建立目标设备 TCP 502 端口的连接数据通信的过程：准备 ModBus 报文，包括 7B 的 MBAP 在内的请求；使用 send（）命令发送；在同一连接等待应答；阅读报文，完成一次数据交换过程。当通信任务结束时，关闭 TCP 连接，使服务器可以为其他实体服务。

ModBus/TCP 请求报文举例见表 9-8。

表 9-8　ModBus/TCP 请求报文举例

	描述	大小/B	示例	备　注
MBAP	传输标志 Hi	1	0×15	传输标志用于和应答配合使用
	传输标志 LO	1	0×01	每对传输使用惟一的标志
	协议标志	2	0×0000	该域可用作寻址 ModBus/ModBus⁺子网的路由，此时包括目的设备的地址
	长度	2	0×0006	
	单元标志	1	0×FF	
ModBus 请求	功能代码	1	0×03	读寄存器
	起始地址	2	0×0005	
	寄存器数	2	0×0001	

2. 客户端/服务器通信模式

ModBus/TCP 工业实时以太网采用客户端/服务器的模式交换实时数据信息。该模式下主要使用 4 种报文类型：ModBus Request（请求）、ModBus Confirmation（确认）、ModBus Indication（指示）和 ModBus Response（响应）。

各种报文类型的功能是：

1）ModBus Request（请求）：为客户端发起通信请求帧；

2）ModBus Confirmation（确认）：客户端收到数据后的确认；

3）ModBus Indication（指示）：服务器端收到客户端提出服务的请求确认；

4）ModBus Response（响应）：服务器端对客户端服务请求做出响应，向客户端开始发送数据提供服务。

9.9　工业以太网监控系统的结构

应用工业以太网技术组建的监控系统称为工业以太网监控系统。工业以太网监控系统基本有：C/S（客户端/服务器）结构与 B/S（浏览器/服务器）结构，工业以太网监控系统可以是单一的一种结构，也可以是以上两种基本结构的组合。

应用系统结构模式的选择对系统的性能、效率、安全性、可维护性有着重大的影响，做好监控系统设计的一项重要工作就是根据实际现场环境和监控的要求选择合适的系统结构模式。

9.9.1　C/S 结构

C/S 结构一般是两层级结构，显示逻辑和事务功能置于客户端，数据处理逻辑和数据库置于服务器端。客户端指用户使用的终端设备一侧，负责执行管理用户接口、数据处理和报告请求等功能。而服务器执行后台功能，如管理共享外设、控制对共享数据库的操作、接收并应答客户机的请求等。C/S 结构的表述框图如图 9-31 所示。

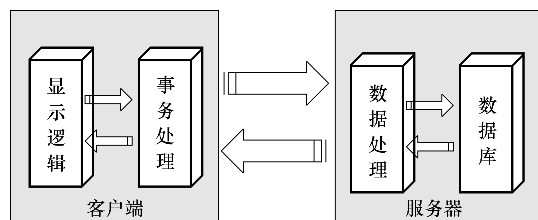


图 9-31　C/S 结构的表述框图

在系统规模较小、用户数量少、数据库单一和安全情况较好的网络环境的条件下，采用 C/S 模式是较适宜的。当应用系统监控点数数量较大，系统的大型化以及用户对系统性能要求不断提高时，C/S 结构暴露出许多缺点：程序开发量大，客户端维护困难，客户端负担重、成本高，系统安全性变差等。

C/S 模式有一些显著的优点：交互性强，在 C/S 模式中，客户端应用程序功能性强，并可以开发内容较为丰富的相关系列应用程序；客户端与服务器间只传输命令和处理结果，因此客户端和服务器之间的通信量较小，使系统的数据通信量整体来讲较小；提供了安全的存取模式，由于 C/S 模式是点对点的结构模式，应用网络环境是局域网，采用安全性比较好的网络协议，因此安全性较高。

以 Web 技术为基础的 B/S 模式已日益显现其先进性，但与 C/S 模式相比仍不成熟，基于 Web 的 B/S 模式使用描述语言通用性很强，紧紧地与以太网主流技术的发展联系在一起，但与 C/S 模式相比，功能有限，如果要实现复杂的监控功能，软件开发的工作量较大。

Web 技术是 Internet 技术中最精彩的一部分内容之一，HTTP 是传输和处理 Web 文件的基本协议，Web 文件使用超文本标记语言（HyperText Markup Language，HTML）来组织所有文字、图像、声音和多媒体资源，远端的客户端和服务器之间的数据显示通过浏览器进行。工业以太网同常规商业以太网一样可以应用 HTML 来组织 Web 文件，也同样可以使用 HTTP 来组织和控制 Web 文件数据码元序列的传输及在浏览器上显现结果。

在使用工业以太网作为通信网络架构 BAS 中，控制器使用基于 Web 的软件、程序运行，通过 Web 程序实现 BAS 中控制、状态、管理等数据的采集、控制与管理。

9.9.2　B/S 结构

随着 Internet 越来越广泛地应用，原来基于局域网的企业开始采用 Internet 技术来构筑和改建自己的企业网，即 Intranet。于是一种新型的计算机模式（B/S 结构）应运而生，并获得飞速发展，大有取代 C/S 结构的趋势。B/S 结构是由 C/S 结构发展而来的 3 层 C/S 结构在 Web 上的应

用特例，在这种体系结构下，系统分成 3 个层级：表示层、功能层和数据层，这 3 个层分别放置在 Web 浏览器、Web 服务器和数据库服务器中。

B/S 结构如图 9-32 所示。

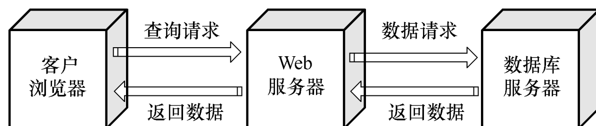


图 9-32　B/S 结构

表示层在客户端单元，基本功能是通过 Web 服务器提出数据请求和接收 Web 服务器传送过的 Web 文件进行显示；功能层置于 Web 服务器实现，此处的 Web 服务器主要功能是接收客户端用户的数据服务请求，执行相应的应用程序访问数据库，并将得到的结果处理后，以通用的格式传送回客户端屏显服务的内容。数据层位于数据库服务器端，主要功能是接收 Web 服务器对数据库进行各种操作，实现对数据库数据读取、存储、查询、修改、更新等功能，把运行结果提交给 Web 服务器。B/S 结构具有以下优点：开放性好；开发、维护成本低；系统安全性好；扩展性好等。

9.9.3　B/S 与 C/S 相结合的体系结构

B/S 结构与互联网主流技术吻合得很好，C/S 结构技术成熟，进行实际监控系统设计考虑系统架构时，既可以根据应用情况选择其中一种结构，也可以使用由两者复合而成的结构。

一般情况下，在安全性要求高、具有较强的交互性、地点固定、系统中的客户端分布范围较小时，可以选用 C/S 模式；如果使用范围广、地点灵活、功能变动频繁、安全性和交互性要求不高，易于大区域进行信息发布等情况下，可以选用 B/S 模式。当然也可以采用复合结构，灵活地组建监控系统。在楼宇智能化控制系统中，B/S 模式的结构已经占据主导位置。

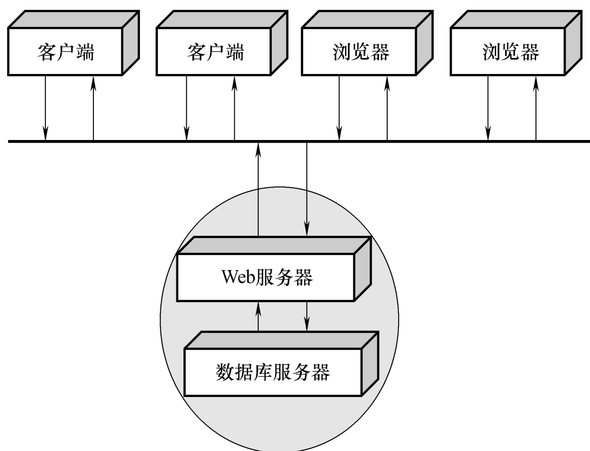


图 9-33　复合结构的示意图

复合结构的示意如图 9-33 所示。

图 9-33 中的一种灵活结构是远端客户通过 B/S 方式访问 Web 服务器和数据服务器，而监控中心则以 C/S 模式直接访问数据服务器。

9.10　工业以太网的部分主要设备

9.10.1　一个工业以太网的解决方案

1. 工业以太网的核心层、汇聚层和接入层

（1）核心层

采用高带宽的万兆位工业核心交换机，汇聚层和接入层提供千兆位带宽。

1）多个 10GbE 口；

2）多个 1GbE 连接头；

3）工业级设计；

4） 无间断运行；

5） 可组建大规模的应用系统。

（2） 汇聚层

模块化导轨与机架式工业交换机。

1） 多个 1GbE 连接头；

2） 高密度端口；

3） 灵活的模块化设计，支持 IPv6。

（3） 接入层

独立模块化导轨交换机。

1） 支持丰富的智能网络管理协议和集成的安全保护功能；

2） 可以采用多种交换机，各种端口数的交换机；

3） 可采用快速以太网或千兆位以太网；

4） 网管式和非网管式工业交换机，从 PoE 到 PoE + 先进的性能；

5） 支持 IPv6。

这里的 PoE（Power over Ethernet） 指的是在现有的以太网超五类布线基础架构不作任何改动的情况下，使用网线为不同的 IP 终端传输数据信号的同时，还能为此类设备提供直流电源。

2. 核心工业以太网交换机的性能指标

1） 高性能平台，支持多达 4 个 10GbE 端口；

2） 灵活的介质，可配置多达几十条光纤连接；

3） 工业级无风扇设计和工作温度范围 0 ~ 60℃；

4） 隔离冗余电源接入，通用 110/220V 交流电源。

该交换机可以用来建立大容量的高可靠骨干网络，支持融合视频、语音和数据服务，该千兆位核心交换机提供多个 10GbE 端口，满足大型工业网络的性能要求。

该交换机具有很高的可靠性和良好的环境适应性。交换机通过了一组设计和生产上的测试来检验可靠性和耐久性，包括 ESD、浪涌保护/EFT，温度耐受性、振动/冲击以及老化试验。交换机遵守一系列工业认可标准，支持下一代 IPv6 网络标准，与自动化系统无缝兼容。具有高效的网络性能、可靠的网络安全性。

9.10.2 工业以太网供电 PoE 交换机

工业以太网供电 PoE 交换机，满足供电 pre-802.3at 及 802.3af 的标准。在电源安装不易或成本过高时，PoE 交换机通过它们的 10Mbit/s/100Mbit/s 提供稳定的 DC 电源给网络设备，例如无线 AP、VoIP 电话、POS 读卡、IP 摄像头以及其他网络监控 PoE 设备。PoE 使得网络安装能够更轻松、更快速和更经济地完成。

PoE 工业交换机的主要优势和特征如下：

1） 简单、快速和安装成本低；

2） 灵活、高效的网络设计；

3） 集中式电源管理；

4） 确保电力安全。

一种 PoE +/ PoE 工业级网管型交换机如图 9-34 所示。这里的“PoE +” 表示交换机支持增强的以太网供电功能。主要技术参数如下：

1） 有 6 口和 16/8 口的，采用导轨安装，M12 连接头，DC 24V/48V；

2）4 ~6 个 PoE 口；

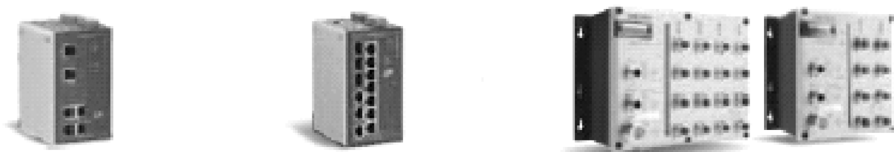


图 9-34　PoE +/ PoE 工业级网管型交换机

3）多个组合千兆位 RJ-45/SFP 口；

4）冗余双电源输入；

5）智能 PoE +/ PoE 供电电源管理、放电故障检查和远程电力重新启动；

6）Turbo Ring 和 Turbo Chain（冗余时间 <20ms）或 RSTP/STP 网络冗余；

7）工业及设计：－40～75℃操作温度范围；

8）支持光纤作为传输介质；

9）经过工业级认证。

还有 PoE +/ PoE 工业级非网管型交换机。

9.10.3　部分工业以太网 PoE 设备和终端

工业以太网设备体系中还有：PoE + 电源供应器、光纤介质转换器和 PoE 分离器。某型号的千兆位 PoE + 电源供应器、PoE 以太网转光纤介质转换器、PoE 分离器如图 9-35 所示。

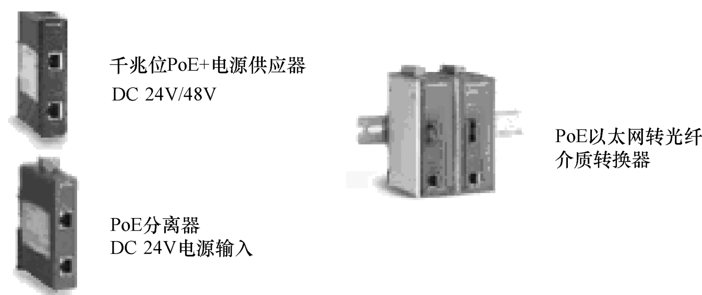


图 9-35　工业以太网中的电源供应、介质转换器和 PoE 分离器

从以太网线缆得到电力供给的设备可以是交换机、IP 摄像头、户外/室内无线 AP/网桥/客户端等，如图 9-36 所示。



图 9-36　以太网线缆为部分设备提供电力供给

9.10.4　工业以太网网关

当工业以太网和其他异构网络互联时，要使用网关实现。使用较多的情况是工业以太网和现场总线的互联。

工业以太网网关的功能如下：

1）直接或转发数据到用户定义的目标端口；

2）为故障诊断提供监测；

3）能够将工业现场串口设备连接到以太网，是简单可靠的串口联网解决方案；

4）支持多个连接和许多不同以太网协议，如 ModBus/TCP 和 Ethernet/IP 等。

一个 1、2 和 4 口标准的工业以太网—ModBus 网关如图 9-37 所示。

主要功能如下：

1）ModBus/TCP 和 ModBus RTU/ASCII 间协议转换；

2）嵌入式 ModBus 协议分析器；

3）硬件设定和配置。



图 9-37　一个 1、2 和 4 口标准的工业以太网—ModBus 网关

还有基于 GPRS 传输的 ModBus 网关，如图 9-38 所示。



图 9-38　基于 GPRS 传输的 ModBus 网关

9.10.5　工业以太网中的交换机

1. 3 种工业以太网中的交换机

自动化控制环境要求较高，如便于安装、维护和使用的功能，办公室级别的设备不需要具备这样的要求。要求高的网络应用需要配置管理型交换机，这类交换机支持 SNMP…提供数据并且报告网络状况，同时还支持其他高端网络功能，例如冗余技术、IGMP snooping 协议、虚拟局域网技术、优先级标签等。

介于管理型和费管理型交换机之间的是智能交换机，除了具备许多先进的网络功能外，同时不需要使用复杂的管理型交换机和 SNMP。3 种工业以太网中的交换机外观如图 9-39 所示。



图 9-39　3 种工业以太网中的交换机外观

若交换机需要进行长距离传输，并且要求有很强的抑制电磁干扰的能力，要使用光纤端口交换机或者媒体转换器。媒体转换器能使电口向光纤的转换快速而有效。

2. 某型号工业以太网交换机性能及技术参数

某型号工业以太网交换机外观如图 9-40 所示。

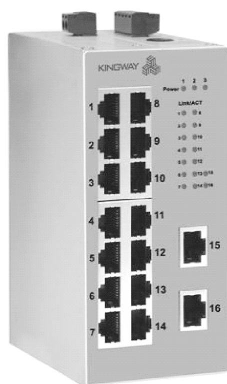


图 9-40　某型号工业以太网交换机外观

（1）性能及技术参数简要介绍

1）16 口 10Mbit/s/100Mbit/s 非网管型工业交换机；

2）100 BaseFx（多模 2km，单模 20kmSC）；

3）工作温度范围 −10 ~ 60℃；

4）导轨，面板，机架安装方式；

5）支持冗余电源；

6）0.35A DC 24V 或 0.7A DC 12V 功耗。

（2）设备特点

1）采用高可靠性工业以太网交换机技术；

2）10/100Base-T（X）（RJ-45），100Base-FX（多模/单模）；

3）支持 IEEE 802.3 10Base-T，IEEE 802.3u 100Base-TX/100Base-FX，IEEE 802.3x；

4）存储和转发交换方式；

5）10Mbit/s/100Mbit/s，全/半双工，MDI/MDI-X 自适应；

6）传输延迟小于 7.9μs；

7）4096 MAC 地址；

8）工业级别的高稳定性；

9）电源输入支持 DC 12 ~ 48V；

10）铝制高强度外壳；

11）冗余电源设计。

（3）主要设备参数

1）无网管功能的工业以太网卡轨式交换机，存储转发模式，以太网（10Mbit/s）和快速以太网（100 Mbit/s）。

2）协议标准：IEEE 802.3 10Base-T，IEEE 802.3u 100Base-TX/100Base-FX，IEEE 802.3x。

3）线缆长度：双绞线（TP）100m。

多模光纤传输距离：2kM/波长：1310nm；（62.5/125μm）。

单模光纤传输距离：20kM/波长：1310nm；（10/125μm）。

4）组网拓扑：线形/星形拓扑/树形/复合型。

5）输入电源：12 ~ 48V。

6）存储转发速率：14880 为 10Mbit/s，14810pps 为 100Mbit/s。

7）MAC 地址表大小：4096。

8）缓存：1.625 bit。

9）传输延迟：小于 7.9μs。

10）工作温度：−10 ~ 65℃。

11）相对湿度（无凝结）：10% ~ 95%。

12）EMC 防干扰特性：

① EN 61000-4-2 防静电（ESD）+4kV 接触放电，+8kV 空气放电；

② EN 61000-4-3 电磁场 10 V/m（80 ~ 1000MHz）；

③ EN 61000-4-4 瞬时高压（burst），+4kV 电源线，+1kV 数据线；

④ EN 61000-4-5 浪涌电压电源线：+2kV（线/地），+0.5kV（线/线），+1kV 数据线；

⑤ EN 61000-4-6 防传导 3V（10 ~ 150kHz），10V（150kHz ~ 80MHz）；
⑥ 振动 符合 IEC 60068-2-6；
⑦ 冲击 符合 IEC 60068-2-27；
⑧ 掉落 符合 IEC 60068-2-32。

9.10.6　工业以太网中的路由器

路由器连接两个网络，允许必要的数据流通同时阻隔其他数据流通。一种工业以太网中的路由器的外观如图 9-41 所示。

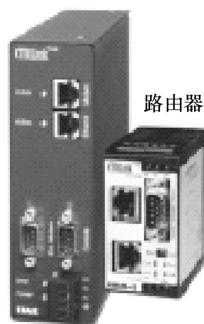


图 9-41　一种工业以太网中的路由器的外观

9.11　工业 IP 视频监控

工业以太网用于工业 IP 视频监控。该系统中包括工业以太网交换机、使用 IP 网络和 PoE 视频摄像头、视频服务器。

1. 工业以太网交换机

某应用系统中的工业以太网交换机如图 9-42 所示。

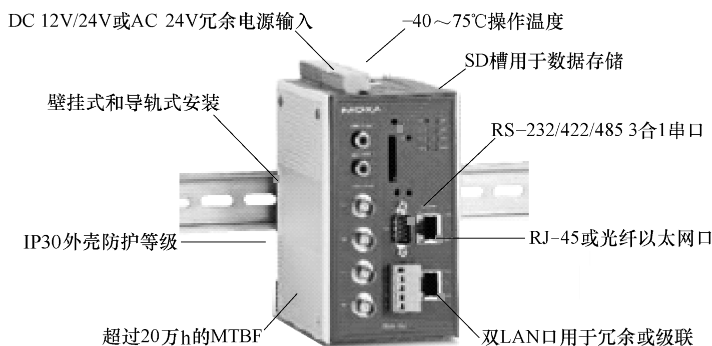


图 9-42　应用系统中的工业以太网交换机

2. 使用 IP 网络和 PoE 视频摄像头

使用 IP 网络和 PoE 视频摄像头如图 9-43 所示。



图 9-43　使用 IP 网络和 PoE 视频摄像头

3. 视频服务器

视频服务器如图 9-44 所示。

4. 视频录制器

视频录制器如图 9-45 所示。

图 9-46 所示为系统中使用的 IP 视频监控软件窗口界面。

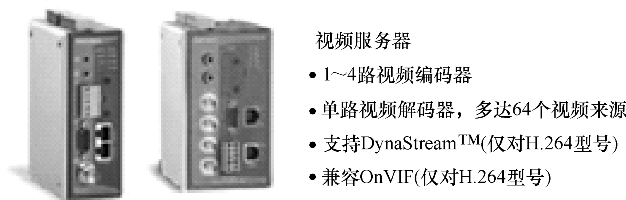


图 9-44　视频服务器

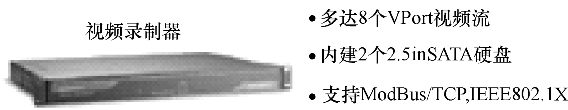


图 9-45　视频录制器

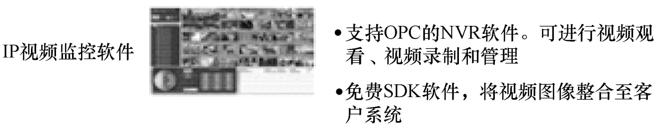


图 9-46　IP 视频监控软件窗口界面

9.12　一些工业以太网的比较

一些工业以太网主要技术参数间的区别见表 9-9。

表 9-9　一些工业以太网的比较

	EtherCAT	Ethernet/IP	PowerLink	ModBus/TCP
市场推广应用组织	ETG EtherCAT Technology Group	ODVA	EPSG	ModBus-IDA
网站	www. EtherCAT. org	www. odva. org	www. Ethernet-powerlink. org	www. modbus-ida. org
技术的开放	ASIC 或 FPGA 码的实例	实例的程序	标准的以太网技术，不需求特殊的 ASICS 接口	实例程序
产品提供	2003	2000	2001	1999
通信结构	Master/Slave	Client/Server	Master/Slave	Client/Server
通信方法	集总帧	面向信息的传输帧	面向信息的传输帧	面向信息的传输帧
实现实时传输的方法	等时传输	通过 CIP Sync 实现时钟同步	采用 polling 的方法实现分时传输	与具体的实施方法有关
实时数据的传递	Ether 帧，也可采用 UDP/IP	通过 UDP,实现 Publish/Subscribe,标准的球帧	通过广播信息的方法实现 Ethernet 帧	标准的 IP 帧
非实时数据的传递	按协议运行	事件性信息传输	非周期性分时传输	非周期性传输

（续）

	EtherCAT	Ethernet/IP	PowerLink	ModBus/TCP
TCP/IP 堆栈	可成为实时堆栈	完整的，无分开的实对堆栈	与实时堆栈并联，用于非周期性数据的传输	完整的，无分开的实时堆栈
传输速率	100Mbit/s	100Mbit/s 10Mbit/s	100Mbit/s	100Mbit/s 10Mbit/s
物理拓扑	线形，链形，树形	星形	星形	星形，树形
逻辑拓扑	开放的环性网络	总线网络	环形	总线网络
模块间网络的构成	通过两个端口实现一个段的连接，不同段间可采用网关	网关（集线器也可以，但不经济）	无网关，仅仅集线器	网关，集线器
硬件解决方法	可以	不可以	有可能	不可以
IP 地址	只能带具有 IP 地址的模块	至设备	至设备	至设备

9.13 TCP/IP 与现场总线通信协议结构的比较

TCP/IP 是一个协议簇，采用四层结构，在 OSI 七层级结构模型中的各个层次中分布不同的子协议发挥特定功能；现场总线的通信协议采用了 3 层结构，见表 9-10。

表 9-10 TCP/IP 的 4 层结构

OSI	TCP/IP			IEC 65118 现场总线
应用层 表示层 会话层	应用层	HTTP DNS Telnet SMTP FTP POP		应用层
传输层	传输层	TCP	UDP	
网络层	网络层	IP		
数据链路层	物理层	以太网、令牌环 FDDI		数据链路层
物理层				物理层

使用 TCP/IP 通信协议工作的以太网，在传输层上可以使用面向连接的 TCP，也可以使用不面向连接的 UDP，对于工业测控系统或 BAS，网络中不同节点间传送的数据一般比较短小，使用 UDP 传输比较经济，但数据传递的确定性当然比应用 TCP 时的情况差得多。另外，在测控网络中，进行数据交换的节点数量远比因特网少得多，因此使用 UDP 传输数据在许多情况下是一种既经济又快捷的通信方式。

在 BAS 中应用 TCP/IP 构建基于 TCP/IP 的楼控系统，并没有专门规定在不同的 BAS 组件元件之间交换温度、湿度或报警等数据的方式和细节性的规范。因此到目前为止，BACnet、LonWorks 以及一些专用的通信协议仍然在 BAS 的通信网络中发挥极为重要的作用。

采用 TCP/IP 作为主导通信协议的楼控系统在跨越行业边界以及与其他异构网络互联互通的能力大为提高。

目前阶段，将 TCP/IP 标准协议作为 BAS 通信网络的核心标准的实现成本较高。相对于现场总线使用的通信协议来讲，TCP/IP 协议簇内容和实现方式更复杂，采用 8 位、16 位微处理器的 BAS 控制器上不能够很完整地实现 TCP/IP。而 32 位和 64 位的微处理器构成的 BAS 控制器就能

较好地胜任现 TCP/IP 的能力，因此，在 BAS 控制器中内嵌和使用 TCP/IP 就能够构成性价比高和通信确定性好的 BAS 通信网络架构的解决方案。

9.14　工业以太网的规划安装调试

9.14.1　工业以太网和商用以太网的主要区别

如前所述，工业以太网是商用以太网技术在控制网络延伸的产物。工业以太网源于商用以太网又不同于商用以太网，实时以太网又是工业以太网中的一大类。怎样按照实际需要构建一个工业以太网系统？怎样应对工业以太网现场应用的大量实际问题，如安装、调试和诊断技术，系统的可靠性，安全性和诊断的可能性，时间需求的确定性等问题？掌握以太网，工业以太网和工业实时以太网技术的区别和特点是在工业领域和楼宇自控领域正确应用以太网的前提。

工业以太网和商用以太网的最主要区别是应用场合和应用对象不同。由于工业以太网用在工业现场和工控领域中，必须考虑用户安装、调试和维修等问题。

工业以太网和商用以太网的主要区别在于：

1. 数据量和数据传输方向

工业以太网传输处理的数据一般为小数据量，且方向性很强；而商用以太网传输处理的数据块一般具有较大的数据量，无确定方向。

2. 传输速率及可靠性、实时性

商用以太网传输处理数据文件时，传输速率较高，但对数据传输的实时性和可靠性要求不高；工业以太网传输数据文件时，一样具有很高的传输速率，但实时性和可靠性要求很高。

实时性表现在对于传输时间的要求很高。在商用以太网中传送一个文件晚几分钟，没有严重的后果；如果在工控领域，则必须对传输时间有非常清晰的要求，如一个现场信号在什么时间内控制器能够得到；控制器的监控指令发出后，什么时间内现场执行机构能够按照制定命令动作。一个高速位置控制系统，如果在通信中丢失了现场传感器的反馈信号，在位置移动控制中超越限定极限位置，则会产生重大事故。

3. 物理安全环境要求不一样

对于商用以太网工作环境是办公空间，一般没有较为复杂、恶劣的环境条件。而工业以太网的工作环境可能非常恶劣，因此要求必须满足：采用冗余电源供电、耐高温、耐低温、防尘条件等。尤其是在很多场合不可避免地存在易燃、易爆或有毒的气体，工业以太网中的设备还要具有防爆的功能。

现场设备的防爆技术包括隔爆型（如增安、气密和浇封等）和本质安全型两大类。本质安全技术采取抑制点火源能量来实现防爆，本质上是一种限定的低功耗技术和本安防爆技术。由于工业以太网收发器很多都工作在 50mA（5V 工作电源）的环境当中，因此实现本安防爆或限定低功耗技术来实现防爆功能困难较多。因此，工业以太网系统采用隔爆防爆措施较为普遍并切实可行，确保现场设备本身故障产生的点火能量不外泄，保证运行的安全性。

4. 控制域与信息网络的隔离

另外，工业以太网实现了与 Internet 的无缝集成，实现了工厂信息的垂直集成，但同时也带来了一系列的网络安全问题，包括病毒、黑客的非法入侵与非法操作等网络安全威胁问题，对此一般可采用防火墙或通过权限控制、数据加密等多种安全机制来加强网络的安全管理，将工业以太网与外部信息网络系统相隔离。

5. 工业以太网中的实时以太网

为了满足各类不同控制对象，控制系统对反应时间有严格的要求，在控制系统反应时间小于 5 ms 的应用中，就要使用实时以太网来架构系统了。这里还需注意：商用以太网、实时以太网和工业以太网控制系统之间反应时间的区别。

工业以太网和实时以太网的工作多采用全双工通信方式。

9. 14. 2 MICE 环境参数和结构化布线标准

1. MICE 环境参数

IEC TC65C 工作组定义了 MICE 环境参数：

1） 机械 （Mechanical）；

2） 侵入 （Ingress）；

3） 气候 （Climatic）；

4） 电磁 （Electromagnetic）。

以上每个环境参数都可由低级（1）、中级（2） 和高级（3）3 个等级来描述。如 $M_2I_3C_1E_1$ 表示 MICE 环境参数为：机械环境参数为 2 级（中级）；外界侵入环境参数为 3 级（高级）；气候环境参数为 1 级（低级）；电磁环境参数为 1 级（低级）。

MICE 环境参数有 3 个等级：

1）等级 1：通用；

2） 等级 2：轻工业环境；

3） 等级 3：重工业环境。

MICE 环境参数见表 9-11。

表 9-11 MICE 环境参数表

		从左至右严重性增加		
		等级		
机械	冲击	M_1	M_2	M_3
	振动			
	拉力			
	压力			
	撞击			
侵入	微粒	I_1	I_2	I_3
	沉浸			
气候	温度	C_1	C_2	C_3
	周围环境			
	变化率			
	湿度			
气候	紫外线辐射	C_1	C_2	C_3
	阳光辐射			
	液体污染			
	气体污染			
电磁	ESD（静电放电）	K_1	K_2	K_3
	辐射 RF（射频）			
	传到 RF			
	EFT（瞬间放电）			
	振荡			
	磁场			

2. 结构化布线标准

工业以太网控制系统中的布线线缆要满足相关的技术标准和规范。这些规范包括了所有计划、设计和安装阶段的内容，以及配置、性能、一致性测试和系统的最后验证。

进行布线规划、选型、安装和网络性能测试依据的 3 个主要国际标准见表 9-12。

表 9-12　3 个主要的国际标准

区域和标准		标准组织	描　述
美国	TIA/EIA-568-B	电信工业协会	商用楼宇电信布线标准——定义了怎样设计、组建和管理一个结构化布线系统
		电子工业协会	
国际	ISO/IEC 11801	国际标准化组织	通用用户事务布线标准——定义用户事务的通用布线规范，基于 TIA/EIA-568
		国际电工委员会	
欧洲	CENELEC EN 50173	欧洲电子技术标准委员会	定义通用布线和欧洲开放市场布线元件，基于 ISO 11801

9.14.3　工业以太网的网络结构和虚拟局域网

1. 工业以太网拓扑结构

工业以太网的拓扑结构主要有：

1）总线型；

2）星形；

3）菊花链形；

4）环形；

5）双环形；

6）网格网。

2. 总线型拓扑

在进行网络结构组织时要注意：如果采用总线型拓扑，线缆终端要使用终端器来吸收总线上电磁波信号的反射部分；网络中的不同网段可以通过中继器或网桥来连接扩充网络的覆盖范围。

3. 菊花链拓扑

采用菊花链手拉手的拓扑结构，设备是主干电缆的一部分。在菊花链上的每个设备都有两个网络接口，信息流经设备。这种拓扑的优点是低成本，不需要考虑连接器。缺点是菊花链中的一个设备失效，网络等于断开，菊花链拓扑构建的系统更容易超载。

4. 环形拓扑

环形拓扑结构中，物理环可以和逻辑环吻合，也可以不吻合。环形拓扑能够提供信道冗余功能。用于实现环形拓扑所需要的组件一般比总线或星形拓扑需要的组件成本高。

对于工控领域中的许多应用系统，生产工艺过程不允许停机，此时就要使用双环型拓扑结构的网络。双环形拓扑结构如图 9-47 所示。

一个双环形网络具有单环形网所有的特性，并具有更好的信道容错能力。两个环通过主要/冗余路径连接，当出现网络通信异常时，网络设备会自动切换到另一路径。

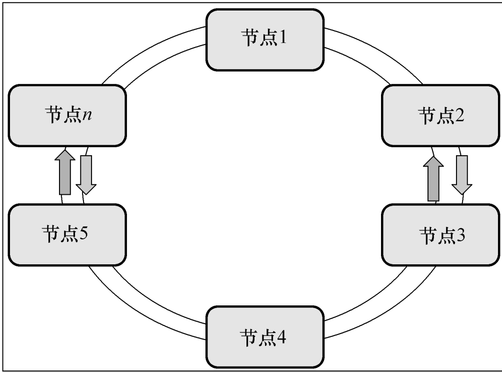


图 9-47　双环形拓扑结构

冗余环的优缺点见表 9-13。

表 9-13 冗余环的优缺点

优　　点	缺　　点
不复杂，仅需要一个物理连接性价比好，使用单一接口和网络自动自恢复，检测失效和重新路由数据包	如果两个连接同时失效，连接的关键设备通信无法进行

5. 网格网拓扑

网格网的拓扑结构用于较大规模的网络，每个节点有一个或者多个连接组件。理想情况下，网格网中的每个设备节点直接连接另一个设备。

6. 虚拟局域网

虚拟局域网（Virtual Local Area Network，VLAN）将若干台不在同一个物理位置区域的计算机或网络设备从逻辑上划分成一个局域网，实现资源共享和彼此间的数据通信。使用第 3 层交换机组织 VLAN，只有 VLAN 协议的第 3 层以上交换机才具有组织 VLAN 的功能。

VLAN 通过减小冲突域尺寸和通信负载量，虚拟局域网分解了通信流量，提高了网络性能。在一个环境变化较多的应用场合，VLAN 提供了一种灵活、经济的网络设备变更重组方法。VLAN 还增加了网络的安全性。

划分 VLAN 的方法有多种，如根据端口划分，根据 MAC 地址划分，根据网络层划分，根据 IP 组播划分，基于规则的划分，按用户定义、非用户授权划分等。商用以太网中 VLAN 的组织方法和工业以太网中 VLAN 的组织方法基本相同。虚拟局域网有一些限制，包括广播数量、以太网地址和端口约束。

使用 VLAN 技术，工业以太网的应用范围和不同环境应用的灵活性都大为提高。

9.14.4 规划和组建一个工业以太网要考虑的问题

1. 规划一个工业以太网要考虑的问题

规划一个工业以太网要考虑的问题如下：

1）使用工业以太网交换机全双工模式工作。网络中主要使用交换机，一般情况下，能用全双工交换机就不用集线器。工业以太网中一般不要使用集线器。

2）10Mbit/s 带宽的交换机可以用于小型控制系统，但是不用于 PLC/SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition，数据采集与监视控制）系统或主干网络的连接。100Mbit/s 的网络速度是合适的，可用于大多数的自动化系统。

3）采用自修复环路或冗余自修复环路。

4）采用管理型交换机。

2. 组建一个工业以太网的部分注意事项

（1）工业以太网环境中的无线 AP

无线 AP 是无线局域网的接入点，通过无线 AP 接入，无需使用物理电缆，节省了安装和维护费用。无线通信并不是要替代有线网络，而是多了一种通信方法，它使设备可以在不同的位置对网络进行访问。用于工业环境的无线技术必须要与现有的有线网络具有相同的可靠性、性能和冗余，才能满足工业环境中的应用要求。

（2）带宽考虑

10Mbit/s 的带宽可以用于小型终端设备，一般不用于 PLC 控制网络或 SCADA 系统，也不用于主干网络的连接。100Mbit/s 的网络速度用于多数工业控制网络是没有问题的。

1Gbit/s 可用于主干网络的连接。随着发展，千兆位速率的工业以太网用于工业控制是完全现实的。

全双工模式工作的交换机能够将现有的网络带宽提高 1 倍，如在 100Mbit/s 的网络环境中，交换机工作在全双工模式下，实际享有 200Mbit/s 的带宽。

（3）电磁辐射

电磁兼容（Electro Magnetic Compatibility，EMC）描述了设备或系统在特定的电磁环境中符合要求运行并不对其他设备产生无法忍受的电磁干扰能力。EMC 包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值；另一方面是指器件对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度。

两个主要制定 ENC 标准的组织是 IEC 和 CENELEC。两个主要用于电磁辐射的国际标准如下：

1）IEC 61000-6-2—2005：电磁兼容性（EMC）. 第 6-2 部分：通用标准. 工业环境的抗扰度。

2）IEC 61000-6-4—2007：电磁兼容性（EMC）. 第 6-4 部分：一般标准. 工业环境的辐射标准。

安装工业以太网设备和装置时，需要注意的是：

1）电气电路和屏蔽接地的方法；

2）屏蔽的质量；

3）应用环境。

（4）工业以太网使用的电缆和连接器

1）工业以太网使用的对绞电缆：工业以太网要求必须使用屏蔽的超 5 类双绞线或者更好的电缆。屏蔽超 5 类双绞线的信道传输速率可达 350Mbit/s。超 5 类线，具有 5 类线的全部特性，有更高的质量和更小的串扰。它有更小的双绞扭矩。TIA/EIA 568A-5 定义了这种电缆。

2）典型制式网络中使用的光纤：将一部分典型制式以太网用于工业环境中，使用的光纤必须满足相关制式以太网的物理层规范，如 10Base-FL 光缆规范、100Base-FX 光缆规范等。

①10Base-FL 光缆可用于骨干网络线缆，距离可达 4km。TIA/EIA 商用楼宇布线标准批准了 10Base-FL 可以用于校园楼宇之间的连接。工作在全双工模式下的 10Base-FL 网络的数据传输速率可达 20Mbit/s，最大的网段长度可达 2000m。使用较多是多模光纤（62.5μm/125μm：62.5μm 光纤芯带有 125μm 的覆层），工作波长为 850nm。

②100Base-FX 光缆规范：100Base-FX 物理层规范使用 IEEE 802.3u 标准，用于快速以太网（100Mbit/s）的光缆实现。全双工模式下，100Base-FX 网络的传输速率可达 200Mbit/s，最大网段长度为 2000m（全双工）。典型使用的光缆是多模光纤（62.5μm/125μm），工作波长为 1300nm。

随着发展千兆位以太网应用在工业环境会越来越多，按照对应的物理层规范使用光缆。

3）用于铜线网络的以太网连接器：

① 铜线连接器规范：下面以施耐德电气公司工业网络的实际工程应用来介绍铜线网络的以太网连接器的情况。

施耐德电气公司推荐：在办公室和轻工业环境使用 RJ-45 连接器，在重工业环境使用 M12 带有 D 编码的 4 极圆形连接器。施耐德电气公司推荐的用于工业以太网铜线连接器的规范见表 9-14。

表 9-14 施耐德电气公司推荐的用于工业以太网铜线连接器的规范

环　　境	连接器	通用规范	参　　考
轻工业	RJ-45	针脚分配：ISO/IEC 8802-3	IEC 60603-7 和 TIA/EIA 568B
		针脚引线颜色码：TIA/EIA 568B	
		屏蔽	
重工业	M12 带 D 编码 4 极	屏蔽	IEC 61076-2-101

关于非屏蔽型 RJ-45 连接器的介绍此处从略。

② 屏蔽型 RJ-45 连接器：施耐德电气公司推荐在办公室和轻工业环境使用带屏蔽的 RJ-45 连接器，并且使用超 5 类的 STP 线缆，用于部署 10Base-T 和 100Base-TX 工业以太网。电缆屏蔽层应该在电缆的两个结束端都接地。

③ M12 圆形连接器：虽然 M12 圆形连接器已经在许多重工业应用中用于现场总线的连接。但 M12 圆形连接器现在还不是定义的标准。施耐德电气推荐在重工业环境下使用带 D 编码的 M12-4（4 极）用于工业以太网。

M12 圆形连接器及针脚如图 9-48 所示。

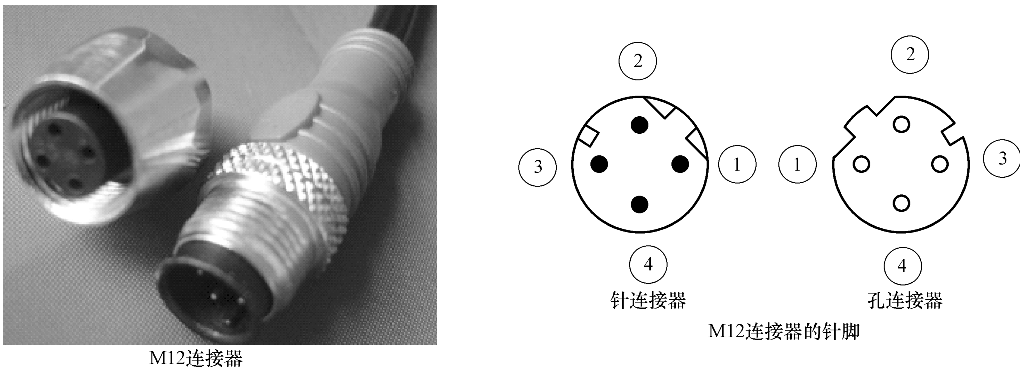


图 9-48　M12 圆形连接器及针脚

对于以太网 10Base-T 和 100Base-TX 制式的以太网，M12 圆形连接器针脚和以太网信号的对应关系见表 9-15。

表 9-15　M12 圆形连接器针脚和以太网信号的对应关系

M12 圆形连接器针脚	以太网信号	M12 圆形连接器针脚	以太网信号
1	发送 +（TD +）	3	发送 -（TD -）
2	接收 +（RD +）	4	接收 -（RD -）

3. 工业以太网中设备的连接

工业以太网中使用铜缆对各种不同的网络设备按照规范进行连接。以太网线缆有直通线和交叉线两类。

网络线缆在连接设备中的使用方法见表 9-16。

表 9-16　网络线缆在连接设备中的使用方法

设备 1	设备 2	线型
计算机	计算机	交叉线
计算机	交换机	平行线
计算机	Up-link 口	平行线
交换机	交换机	交叉线
交换机	Up-link 口	平行线
Up-link 口	Up-link 口	交叉线

第 10 章　BAS 及技术

10.1　BAS 基础知识

10.1.1　BAS 的功能和特点

BAS 是一套完全符合国内、国外等相关标准和规范的建筑物机电设备控制系统，它负责完成建筑物中的暖通空调系统、给排水系统、变配电系统、照明系统、电梯等系统的监控管理，确保建筑物内环境的舒适和安全，同时实现高效节能要求。BAS 可根据不同用户需求和不同规模的建筑物进行组建，既可用于小型建筑物，又适合应用于功能复杂、设备众多的大型建筑物和建筑群。BAS 能够广泛应用于工矿企业、商业中心、办公楼、会展中心、体育馆、医院、学校、住宅小区等各类建筑物。

1. BAS 的主要特点

先进的 BAS 主要有以下一些特点：

（1）通信协议标准化

BAS 采用了国际标准化协议及标准化协议群，如 BACnet 协议、LonTalk 协议、TCP/IP 等。现代建筑配备的 BAS 一般具有一定程度的开放性，不同厂家生产的建筑机电设备可以综合在一个系统中，这样就可以使系统能在日后得以方便地扩展和升级。

（2）能源管理数字化

强大的能源管理功能不仅可使用户对水、电、气、冷（热）负荷的每一项费用的细节了如指掌，明白消费，而且系统还提供节能控制方案，实现了能源管理的数字化、精确化。

（3）功能设计一体化

一体化的功能设计，实现了与安防、消防、通信、办公等系统互联互通、信息共享。通信结构简单化：管理层采用以太网进行通信，控制层可以采用其他网络，也可以直接采用以太网。

（4）集散型控制方式

既可以采用分布式控制模式，分散到就地控制，控制调节功能可由系统的控制器独立操作完成，而不依赖主机，也可以由中央管理工作站直接对各子系统进行集中控制管理。通过集中管理、分散控制这种集散式监控结构的设计原则来实现整体功能。

（5）整个系统架构在一个有效的通信网络环境中

每一个 BAS 都有一个通信支持网络环境，在这个网络环境中，网络分为两大层：管理层和控制网络层。BAS 中的中央监控主机挂在管理网上，现场控制器则挂接在控制网络上，传感器和控制器的输入端子连接，执行器和控制器的输出端子连接。

2. BAS 的主要功能

BAS 的主要功能有：

（1）创造舒适的建筑物内部环境

BAS 可根据人们的需求自动调节控制建筑内部温度、湿度、空气质量、灯光照度及相关设备的运行，满足人们对环境舒适性的要求；可适应不同用户的舒适感要求，支持个性化设定，并且可自动存储个人习惯参数曲线，实现自动调节、分区调节，使建筑环境中的工作人员处处享受到

舒适的工作环境。

（2）实现节能

在保证为用户提供和保持一个舒适的工作和生活环境的情况下，对各个不同区域需要的冷（热）负荷进行定量化监测和控制，通过这些已知的动态参数，结合建筑内外环境参数，通过控制各系统机电设备，实时改变水量、风量、热量、电量供应，使所有设备的运行在满足人们需求条件下以节能方式运行，再通过系统的能耗管理数字化手段统计各设备和各使用区域能耗数值，对不同情况下所需能量进行比较，即可确定存在能源浪费区域和产生原因。最后根据结果进行调节控制，使环境在满足需要的前提下，能量被合理使用。

通过 BAS 实现有效节能管理，节能效果显著，同时大大优化了建筑内能源的使用，节省了大量的费用。

建筑中设备和设施的运行和管理会产生各种各样的费用，通过 BAS 的监控环节，可以准确了解各项运营费用，及时发现和解决问题，从而减少不必要的开销和浪费。另外，通过 BAS 提供的维护手段，可以减少管理和维护人员数量，降低人工成本。

10.1.2　BAS 的组成和监控对象

1. BAS 的监控对象

BAS 也叫建筑设备监控系统，根据 GB 50339—2003，BAS 的监控范围是：空调与通风系统、变配电系统、公共照明系统、给排水系统、热源和热交换系统、冷冻和冷却水系统、电梯和自动扶梯系统等各子系统。如果指广义的 BAS，则还包括：火灾报警及联动控制系统及设备、安全防护系统及设备。

2. BAS 的组成

广义的 BAS 将 FA（消防系统）、SA（保安系统）包含其中，并由以下子系统组成：

1）变配电系统；

2）照明系统（工作照明、事故/艺术照明）；

3）环境控制系统（空调及冷热源、通风监控、给排水、污水处理、卫生设备）；

4）保安系统（防盗报警、电视监控、电子巡更、出入口门禁控制）；

5）消防系统（自动监测与报警、灭火、排烟、联动控制）；

6）交通运输系统（电梯、电动扶梯、停车场）。

BAS 在现代建筑中所起的作用主要通过 4 个功能来体现：

1）使用自动化手段满足环境舒适度要求；

2）降低环境设备管理及运营成本；

3）实现设备安全保护；

4）节能运行、降低能耗实施能源管理自动化。

建筑内许多不同的机电设备分布在楼宇的各个部位及场所，BAS 使这些设备安全可靠、经济和节能地运行。

3. BAS 的软件功能

BAS 软件含系统软件和分站软件。

（1）系统软件

系统软件包含以下功能：

1）系统操作管理。如访问/操作权限控制等。

2）系统开发环境。向软件编制人员提供进行系统设计、应用的工具软件，能够进行新功能

开发。

3）多控制方式。对 BAS 中的诸设备进行多方式控制。

4）警报的完善处理应对功能及记录。

（2）分站软件

现场控制器使用分站软件。分站软件具有的功能应包括：采集和数据处理、通信、控制、程序控制、报警参数设置及整定。

10.1.3 BAS 中的传感器和执行机构

1. 传感器

对于 BAS 中的许多现场非电物理量是由传感器将其转换为电量再进行处理的，如果要将各种电量，如电压、电流、功率和频率转换为标准输出信号（电流 4～20mA 或 0～10V 的电压量），还要使用电量变送器。

BAS 常用传感器有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、压差传感器、防冻开关、水流开关、液位开关等。

传感器是控制系统实时测控数据的来源，其稳定性及准确度直接影响控制系统的控制效果与准确度，还会影响到楼宇内机电设备的能耗。

传感器选型时，需要根据测量采集现场实时物理量数据的种类，传感器要求环境，DDC 可接收信号的类型、测量范围和测量准确度等多方面因素综合考虑。不同的测量对象有：水、蒸汽、空气等；要求环境有：室内、风道、水道内等。

常用传感器如下：

（1）温度传感器

温度传感器用于测量现场温度。安装形式有：室内、室外、风管、浸没式、烟道式、表面式等。常见测温传感器元件有：硅材料、镍热电阻、铂热电阻、热敏电阻，将这些元件接成电桥，一旦温度变化，电桥将电压量信号检出。

由于应用在不同的场合；温度常用传感器也分为室内、室外、风道和水道等类型，传输信号也包括电压（0～10V）、电流（0～20mA 或 4～20mA），常见的传感元件有铂电阻、热敏电阻等。图 10-1 所示是 4 种常用的温度传感器。



图 10-1　4 种常用的温度传感器

（2）湿度传感器

湿度传感器主要用于测量空气湿度。安装形式也有室内、室外、风道型等。此类传感器如电容式湿度传感器，湿度变化引起电容容值变化，可将变化信号送出。阻性疏松聚合物也是一种湿度传感器测量元件。

湿度传感器测量空气的相对湿度时，其输出信号一般通过变送器输出为直流的 0～10V 电压

或4～20mA的电流信号。图10-2所示是两种常用的湿度传感器。

（3）温湿度传感器

对于空调系统来讲，温度、湿度的测量经常是成对出现的，温湿度传感器就成为了一种常用的传感器。图10-3给出了3种常用的温湿度传感器。



图10-2　两种常用的湿度传感器

室外温湿度传感器及参数如下：

1）温度：-50～50℃；



图10-3　3种常用的温湿度传感器

2）湿度：0～100%RH；

3）电源：24（±10%）V　AC/DC；

4）功率：1.5W；

5）输出：0～10V/4～20mA。

（4）压力/压差传感器

压力传感器有波纹管式和弹簧管式两种，前者用于测量风道静压，后者用于测量水压、气压。

在通风及空调系统中气体压差检测中，要用到空气压差开关，用来进行空气过滤网、风机两侧气流状态的检测。

水压力/压差传感器主要用于冷热源系统，检测水泵的运行状态和进行压差旁通控制。

如HSS-211系列压差开关，用于空气介质，测量范围为100～700Pa；HSS-221系列压力变送器，用于水介质，测量范围为相对压力1～600bar、绝对压力0～25bar，输出标准的模拟信号。

图10-4所示是一种气压差传感器和压差开关的外观。

压差开关的压差范围如下：

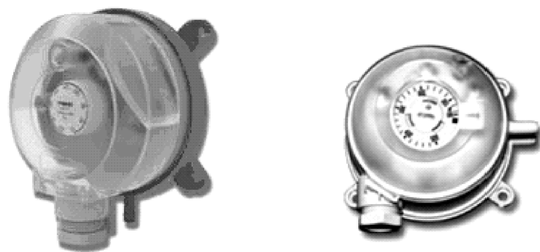
1）20～200Pa；

2）30～300Pa；

3）50～500Pa；

4）100～1000Pa。

型号命名含义：企业标识—产品标识—产品标号，如“TP-33A（B，C）”。


图10-4　气压差传感器和压差开关

（5）压力、差压变送器

气体差压变送器常用于暖通空调设备测风速、风差压测量及洁净环境的微差压监测，可以方便地用于控制系统中。

两种气体差压变送器的外观如图10-5所示。

（6）投入式液位计

投入式液位计主要用于水位测量。一种投入式液位计产品外观如图10-6所示。



图 10-5　两种气体差压变送器的外观



图 10-6　一种投入式液位计产品外观

该产品系列长度范围：2～5～10～100m；

测量范围：0～2～5～10～100m；

电源：DC 24V；

功率：1.5W；

输出电流：4～20mA。

（7）其他一些常用传感器

BAS 中的其他一些常用的传感器有：流量开关、流量计、防冻开关、液位开关、电量变送器、光照度传感器、人体感应传感器和空气质量传感器等。5 种传感器的外观如图 10-7 所示。



图 10-7　5 种传感器的外观

1）防冻开关（低温断路器）的型号和温度设定范围。

防冻开关（低温断路器）是一种在空调系统中使用很多的传感器。

防冻开关的型号命名含义：企业标识—产品标识—感温元件长度，如 A-11D-3（6）。

温度设定范围：1.0～7.5℃。

温度回差：2.5～3.5℃。

保护原理：任何 200mm 长的部位内低于设定点温度，进行报警。

2）水流开关：

① 用途：

a. 冷冻水、冷却水流量监测；

b. 冷冻泵、冷却泵状态监测；

② 触点容量：AC 220V/5A；

③ 应用难点：高层建筑停泵时易发生水锤现象造成叶片损坏。

（8）网络传感器

下面介绍两种网络传感器和近年来成为应用热点的无线网络传感器。

1）网络电量变送器：网络电量变送器是智能型的电参数数据采集模块，可测量三相三线制或三相四线制电路中的三相电流、电压的有效值、功率、功率因数和电耗。

如一种型号为 HSS-411 的网络电量变送器，可直接以三相电压、电流为输入量，输出为 RS-485 数字信号，支持 BACnet/MSTP。该网络电量变送器用于配电室高低压柜、发电机及控制柜电力参数采集。可代替常规的电流/电压/功率/功率因数/电等电量变送器，或是对配电系统进行管理的一些重要传感器。

网络温度传感器：一种型号为 HSS-112W 的网络温度传感器是带 2 组 3 位数字液晶显示的数字化室内传感器，支持 BACnet/MSTP 或 BACnet/EIB，可使用特定软件的图形编程工具进行编程。

该网络温度传感器可连接通用型 DDC 和 VAV 控制器的通信接口作为温度传感器。



图 10-8　某网络型温控器外观

某网络型温控器外观如图 10-8 所示，主要参数如下：

电源：AC 220（±10%）V（50～60Hz）；

设定温度范围：10～30℃，设定 1℃；

控制准确度：±1℃；

控制回差：±0.5℃；

显示范围：0～40℃；

自耗功率：1W；

温度传感器：NTC 热敏电阻；

继电器最大触点电流：2A/AC 250V（感性负载），5A/AC 250V（电阻性负载）；

通信接口：RS-485；

通信协议：ModBus RTU。

2）无线网络传感器

近年来，无线传感器网络技术取得了巨大的进步。无线传感器是在不使用物理线缆的情况下获取现场环境信息的新型载具，无线传感器网络由于可以快速展开、抗毁性强、监测准确度高、覆盖区域大等特点而有着广阔的应用前景，由此成为当前信息领域的研究热点。对楼宇自控领域来讲，在许多情况下要对建筑物内一些区域进行重要的物理量进行随机或实时监测，并进而对这些物理量进行控制，无线传感器网络可以发挥重要的作用。

无线传感器网络的体系结构如图 10-9 所示，整个传感器网络由传感器节点群、网关节点（sink 节点）、互联网及移动通信网络、远程监控中心组成。分布在被检测区域的传感器节点以自组织方式构成网络，采集数据之后以多跳中继方式将数据传回 sink 节点，由 sink 节点将收集到的数据通过互联网或移动通信网络传送到远程监控中心进行处理。在这个过程中，传感器节点既充当感知节点，又充当转发数据的路由器。整个传感器网络是一个以数据为中心的网络，网关节点融合的数据相当于来自一个分布式的数据库。

无传感器网络的基本组成单位是节点，它一般由 4 个模块组成：传感模块、数据处理模块、通信模块及电源。节点都具有传感、信号处理和无线通信功能。节点的电源模块采用只能携带有限能量的电池来实现。图 10-10 给出了 4 种无线传感器的外观图。

图 10-10 中的无线温湿度露点传感器温度测量范围：－40～123.8℃；温度测量准确度：

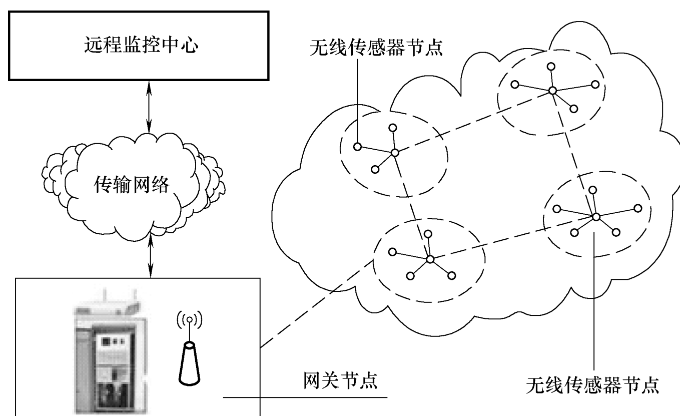


图 10-9 无传感器网络组成



图 10-10 4 种无线传感器的外观图

±0.3℃（25℃）；湿度测量范围：0～100%；应力应变信号数采无线传感器体积小、重量轻、耗电省，内置高能锂电池，连续工作可长达数月到数年。

2. 执行机构

执行器也叫执行机构。在自动控制系统中，执行器接收到来自控制器的控制信号，转换为对应的位置移动输出，通过调节机构调节流入或流出被控对象的物质量或能量，实现对温度、流量、液位、压力、空气湿度等物理量的控制。

执行器可分为电动执行器、气动执行器以及液体执行器（动力能源形式不同），BAS 中多用电动执行器。电动执行器输入信号有连续信号和断续信号。连续信号是 0～10V 的直流电压信号和 4～20mA 的直流电流信号，断续信号是离散的开关量信号。也可用电压为 24V 的 50Hz 交流同步电动机驱动电动执行器。

电动调节阀是一种流量调节机构，电动调节阀安装在管网管道中直接与被调节介质接触，对介质流量进行控制。电动调节阀分为电动机驱动和电磁驱动两种形式。

（1）电动风阀驱动器

常用的电动风阀驱动器输出转矩在几到几十个 N·m 之间；控制信号有：浮点型、比例调节型，反馈信号可选模拟量输出；电源可选 AC 220V、AC 24V 等。

图 10-11 给出了风阀驱动器和电动风阀执行器的外形图。

电动风阀的选型主要依据：由风阀面积选择相应转矩；按照控制要求确定控制信号类型，是浮点控制（开、关、停），还是模拟量输出。

电动风阀执行器的型号命名含义：企业标识-模拟量（数字量）-驱动力（N·m）-工作电压，如某型号的电动风阀执行器型号规格是 T-A（D）-10-24。对于上述型号规格的电动风阀执行器有：



图 10-11　风阀驱动器和电动风阀执行器的外形图

驱动力矩选择：9N · m/m

0.4、0.6、10、16、25、40N · m；

工作电压选择：AC/DC 24V；

控制信号：0 ~ 10V，4 ~ 20nA；

反馈信号：0（2）~ 10V；

电动风阀执行器还有使用 AC 220V 电源的型号规格。

（2）电动水阀及驱动器

电动水阀及驱动器是中央空调控制系统中很重要的执行机构，可精确调节系统中的流量，达到控制温度、湿度、压力等参数。包括控制水系统流量的电动调节阀、电动蝶阀以及风机盘管上用的电磁阀等。

一个电磁水阀驱动器的外形如图 10-12 所示。



图 10-12　一个电磁水阀驱动器外形图

电动执行器选型主要根据：根据关闭和调节压力的要求，来选择输出力矩。执行器的输出力矩要合适，过大或过小都会影响控制准确度，严重时会导致无法正常打开或关闭阀体。

电动水阀的选型首先考虑电动水阀的功能，是控制水流的开关还是调节水流的大小，来确定采用蝶阀门调节阀还是电磁阀。

常用电动驱动器输出力矩一般为几千牛；常用电动水阀有二通阀、三通阀、蝶阀，连接方式有螺纹连接、法兰连接；可应用于蒸汽、热水、冷冻水等不同的介质。风机盘管电动阀也有二通阀、三通阀，工作介质可以为蒸汽、热水或冷冻水。

电动二通阀、蝶阀及驱动器外观如图 10-13 所示。



图 10-13　电动二通、蝶阀及驱动器外观

1）电动两通阀与驱动器（座阀）

电动两通阀与驱动器（座阀），主要型号规格参数如下。

型号规格：企业标识驱动力（N）数字量（模拟量）

驱动力：500N～1000N

流量特性：等百分比或等线性。

特点：直行程

2）电动两通阀与驱动器（球阀）：电动两通阀与驱动器（球阀）外观如图 10-13 所示。

驱动器型号：企业标识　模拟量（数字量）驱动力（N）工作电压，如某电动两通阀驱动器的型号规格 TA（D）04、06、10-24。

介质：水或蒸汽；

介质温度：普通型为 -5～110℃，散热型为 -5～180℃；

控制信号：0～10V/4～20mA；

特点：角行程。

3）电动蝶阀　主要型号规格参数有：电源、功率、数字式或模拟式和两通方式。

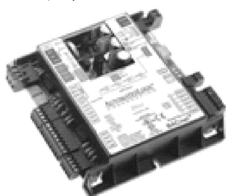
10.1.4　DDC 功能和结构

1. DDC

DDC（Direct　Digital　Controlor，直接数字控制器）不借助于模拟仪表，而将系统中的传感器或变送器的输出信号输入到微处理器中，经计算后直接驱动执行器。

DDC 安装在被控设备附近。各种被控变量（温度、湿度、压力等）通过传感器、变送器按一定时间间隔采样读入 DDC。读入的数值与 DDC 记忆的设定值比较，出现偏差，按预先设置的控制规律，计算出为消除偏差执行器需要改变的量，来直接调整执行器的动作。DDC 中的 CPU 速度很快，能在很短时间内完成一个回路的控制，可以在不同的微小时间间隔内控制多个回路，所以一个 DDC 可以代替多个模拟控制仪表。图 10-14 所示是 6 种 BAS 中用到的 DDC。

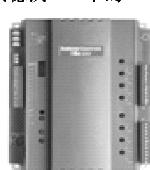
奥莱斯BAS中的DDC



研华BAS中的DDC



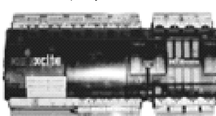
安德沃BAS中的DDC



艾顿BAS中的DDC



卓林BAS中的DDC



西门子BAS中的DDC

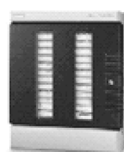


图 10-14　6 种 BAS 中用到的 DDC

DDC 型号、规格不同，输入输出总点数不同，可完成不同种类建筑电气设备的控制。DDC 体积小、连线少、功能齐全、安全可靠、性价比高。集散型控制系统（DCS）通过通信

网络将不同数量的 DDC 与中央管理计算机连接起来，完成各种采集、控制、显示、操作和管理功能。

DDC 分为专用控制器和通用控制器两大类，前者是为专用设备配置的控制器，后者可控制多种设备。空调机 DDC 控制器、灯光控制器等是专用 DDC 控制器。通用 DDC 具有模块化的结构，实际工程应用时，可选用不同模块进行 DDC 配置，结构灵活，功能随要求而定。

DDC 安装在控制设备附近，具有防尘、防潮、防电磁干扰，耐高温和耐低温环境的能力。

2. DDC 的功能

在 DCS 中，由传感器、变送器等现场检测仪表送来的测量信号送给 DDC，DDC 对这些信号进行实时数据采集、滤波、非线性校正、各种补偿运算、上下限报警及累计量计算等。DDC 再将测量值、状态检测值送入中央管理计算机数据库，进行实时显示、优化计算、数据管理、报警打印等。

DDC 可直接完成对现场传感器和执行器的控制，它是一种多回路的数字控制器，它将现场测量信号与设定值进行比较，按照产生的偏差完成各种开环控制、闭环控制，并控制和驱动执行机构完成对被控参数的控制。

DDC 中的多路采样器按顺序对多路测控参数进行采样，经过 A-D 转换输入微处理器，微处理器按预先确定的控制算法，对各路参数比较、计算和分析，将处理后的数字量再经 D-A 转换，按顺序输送到相应的各执行机构，实现对过程中的参数控制，使其保持预定值。

DDC 基本组成如图 10-15 所示。

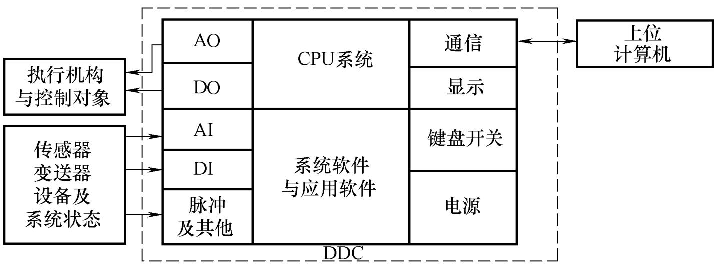


图 10-15　DDC 基本组成框

DDC 可直接接收来自中央管理计算机（站）发出的操作命令，对控制设备和控制参数进行直接控制。任何一个 DDC 都有与其他 DDC 进行通信的功能。在 DCS 中，显示和操作功能集中在中央管理计算机，对于 DDC 来讲，可通过便携式计算机或现场编程器对 DDC 进行编程和对系统参数进行修改。现场编程器一般配置小型显示器、小型键盘及按钮组成人机界面，可在现场对 DDC 进行变量调整、参数设置等较简单操作，还可以使用现场编程器对检测参数给予显示。

在 DDC 独立使用时，选配合适的人机接口，对系统现场测试、编程和参数调整是非常便利的。DDC 的主要参数有：输入、输出点数，数字输入量（DI），模拟输入量（AI），数字输出量（DO），模拟输出量（AO）等。

若能完成模拟量和数字量的处理，则叫通用输入量和通用输出量。通用输入量用 UI 表示，通用输出量用 UO 表示。

如果 UO 表示模拟量输出，使用继电器模块后，转换为数字输出。DDC 能处理交、直流电压信号，当电压≥直流 5V 时，为高电平，当电压≤直流 2.5V 时，为 0 电平。每一个 DDC 都通过输入程序进行特定或多功能的控制，一旦输入程序，即可投入运行。

10.2 中央空调系统的冷源

10.2.1 中央空调及冷源

空调系统是现代建筑中的主要设备系统，是 BAS 的主要监控对象之一。空调系统耗能在建筑总能耗中占 40% 左右。通过 BAS 实现其节能运行，意义重大。空调系统在运行过程中，控制系统要进行实时调控，故对空调系统的控制系统性能要求较高。

空调设备有局部式空调，如窗式空调、柜式空调、专用恒温柜式机等，自身都携带冷/热源及控制系统，不是 BAS 的主要监控内容。BAS 主要对集中式中央空调系统进行监控。但有时也将局部空调的起/停监控纳入楼宇自控的内容中，但这些空调的具体运行还是由自身的控制系统进行控制，不纳入 BAS 中。BAS 中所涉及的空调系统专指中央空调系统，中央空调系统又由冷/热源和前端设备两大部分组成。

当室内空气参数偏离设定值时，采取相应的空气调节技术，使其恢复到设定值，完成空气调节的设备叫空调机组（末端设备），也叫空气处理设备。

常说的空调系统由空调系统前端设备 + 冷/热源组成。空调系统前端设备主要有新风机组、空调机组、风机盘管和变风量空调系统。

冷热源设备是空调系统的主要组成部分。冷热源设备不仅监控过程较为复杂，而且节能技术手段内容丰富。

建筑物中，系统冷源可以是冷水机组、热泵等，这些冷源主要为建筑物空调系统提供冷量；系统热源可以是锅炉系统、热交换器、热泵机组或城市热网等，除为建筑物空调系统提供热水外，还包括生活热水系统。其中，热泵机组既可以作为系统冷源，又可以作为系统热源。热泵机组功率较低，因此单独将热泵机组作为系统冷热源的建筑并不多见。如果单独将冷水机组作为系统冷源，将锅炉系统作为系统热源的话将会造成容量浪费和设备利用率低的缺欠。因为冷水机组在冬天几乎不用，而锅炉系统在夏天也仅仅需要满足生活热水需求，同时冷水机组和锅炉机组的容量又必须满足尖峰负荷需求，因此许多建筑物都将冷水机组和锅炉系统作为主要冷热源，其容量满足大多数情况下的负荷需求，不足部分由热泵机组承担。这种冷热源的配置方式相对比较经济。

由于冷水机组、热泵、锅炉等设备的控制较复杂，BAS 通过接口方式控制这些设备的启/停并调节部分可控参数，如冷冻水出水温度、蒸汽温度等。生活热水系统的监控原理与建筑物空调热源水循环系统的工作原理基本相同，因此下面研究讨论空调系统中冷热源设备监控系统的工作原理。

中央空调冷源系统包括：冷水机组、冷冻水循环系统、冷却水系统；中央空调热源系统包括：锅炉机组、热交换器等。中央空调系统中的冷/热源系统投资费用高、运行能耗高，进行合理的设计来实现运行节能非常重要。

空调冷冻水由制冷机（冷水机组）提供。冷水机组由压缩式（活塞式、离心式、螺杆式、涡旋式）和吸收式冷水机组两大类组成。

要综合考虑建筑物用途、建筑物负荷大小及其变化、冷水机组特性、电源情况、水源情况、初投资运行费用、环保安全等因素来选用冷水机组（制冷机）。

制冷机和冷冻水循环泵、冷却塔、冷却水循环泵一起构成冷源。

10.2.2 冷水机组的分类及运行原理

将制冷机、冷却水、冷水循环水泵、补水箱、集水器、分水器等一些辅助设备安装在专用设

备间，即制冷站中。制冷站中的冷水机组生成的冷冻水通过分水器向各空调区的新风机组、空调机组或风机盘管（空调末端设备）提供冷冻水，冷冻水与这些末端设备进行热交换，升温后又返回制冷站的集水器，再经过冷冻水循环泵加压进入冷水机组进行制冷，整个过程循环进行。冷冻水系统由冷冻水机组、冷冻水循环泵、分水器、集水器、空调末端及一些辅助设备组成。在制冷过程中，通过对冷冻水供回水温度、流量、压力、压差、冷水机组运行台数和差压旁路调节的控制，实现对冷冻水系统的控制来满足空调末端设备对冷源的需求，同时实现节能目的。

1. 冷水机组的分类

（1）压缩式冷水机组

压缩式冷水机组中，制冷剂蒸气在压缩机内被压缩成高压蒸气进入冷凝器，制冷剂和冷却水在冷凝器中进行热交换，制冷剂放热后变为高压液体，通过液力膨胀阀后，液态制冷剂压力急剧下降，变为低压液态制冷剂进入蒸发器。在蒸发器中，低压液态制冷剂通过与冷冻水的热交换而气化，吸收冷冻水的热量成为低压蒸气，再经过回气管重新吸入压缩机，开始新的循环。

在压缩式冷水机组的工作过程中，制冷量即为制冷剂在蒸发器中进行相变时所吸收的气化潜热。

（2）吸收式冷水机组

和压缩式冷水机组一样，吸收式冷水机组也是利用低压制冷剂的蒸发产生的气化潜热进行制冷，区别是：压缩式制冷以电为能源，而吸收式制冷以热为能源。吸收式冷水机组多采用溴化锂水溶液作为制冷冷媒，其中水为制冷剂，溴化锂为吸收剂。

（3）风冷热泵式机组——空气热源热泵

通过制冷剂管路四通阀的转换，夏季可以供冷，冬季可以供热，一台机组可解决全年的空调需求。

2. 冷却塔

冷却水进入冷水机与制冷剂进行热交换，吸收制冷剂释放的热量后水温升高，再通过冷却水循环系统进入冷却塔，降温处理后再循环进入制冷机（冷水机组）进行热交换。

高温冷却水经循环管道进入冷却塔上部喷淋，冷却塔风扇对喷淋下落的水体进行鼓风吹拂，使之与空气发生热交换后冷却，然后再送至冷水机组重复循环使用。

冷却塔是冷源系统的重要组成部分。

3. 冷冻水循环泵与冷却水循环泵

冷冻水循环泵将从空调前端设备返回的冷冻水（12℃）加压后送入冷冻机，在冷冻机内进行热交换，释放热量，降温后离开冷冻机（冷冻机出口冷水温度是 7℃），即冷冻机进口水温为 12℃，出水口温度为 7℃ 。7℃ 的冷冻水再到达空调末端设备进行水/气热交换实现空气降温调节，再循环返回冷冻机，实现冷冻水循环制冷。

冷却水循环泵实现冷却水在冷冻机和冷却塔之间的循环，再通过冷却塔将冷冻机的冷却水的入口和出水口的温度控制在设定值（冷水机组冷却水入口温度为 32℃、出口温度为 37℃）。

4. 冷水机组为空调末端提供冷冻水运行原理

冷水机组生产制备的冷冻水通过分水器为远端的不同空调末端设备提供冷冻水并协调运行的情况如图 10-16 所示。这里的空调末端设备可以是空调机组、新风机组、风机盘管和变风量空调机组。当制冷站与远端空调末端设备距离较远时，冷冻水的输运管路阻尼大，在冷水机组的出水侧加装二级冷冻水泵来克服输运管路的阻尼。

通过 DDC 控制冷冻站的原理如图 10-17 所示。图中给出了传感器、执行器及电控箱和 DDC 的接线关系。

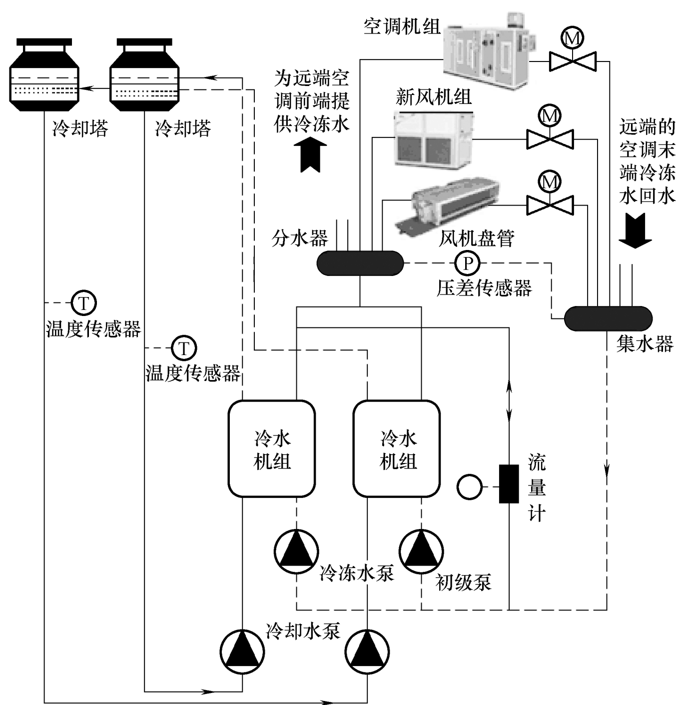


图 10-16　典型空调冷源系统中的冷水机组的工作原理

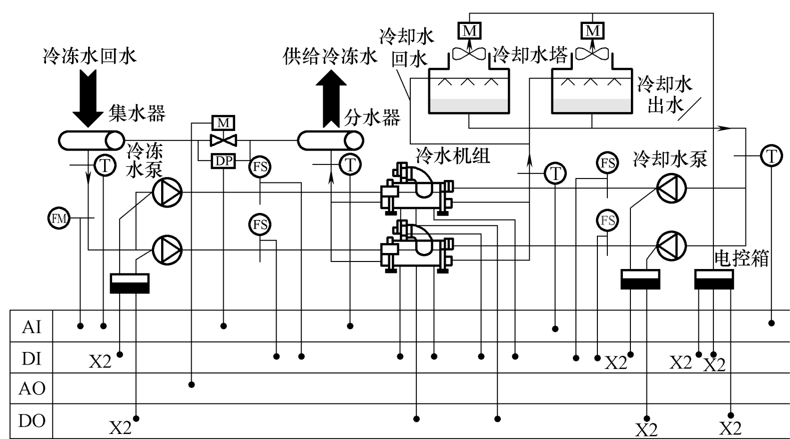


图 10-17　通过 DDC 控制冷冻站的原理

10.2.3　制冷站的自动监测与控制

BAS 对制冷系统的一些主要运行参数进行监控，这些参数有：

1）冷水机组的进水口和出水口冷冻水温度。

2）集水器回水温度与分水器供水温度（一般与冷水机组的进水口和出水口温度相同），这个温度反映末端冷水负荷的变化情况。

3）冷冻水供/回水流量检测。通过对冷冻水（供/回水）流量及供/回水温度检测，可确定空调系统的冷负荷量，并以此数据计算能耗和系统效率。

4）分水器和集水器压力差值（压差）测量。使用压力传感器测量分水器进水口和集水器出

水口的压力，或直接使用压差传感器测量这两个水口的压力差。以供回水压差数据作为控制调节压差旁通阀开度的依据。

5）对冷水机组运行状态和故障进行监测。

6）对冷冻水循环泵运行状态进行监测。

1. 制冷站水系统运行控制

（1）冷水机组的连锁控制

为使冷水机组能正常运行和系统安全，通过编制程序，严格按照各设备起停顺序的工艺流程要求运行。冷水机组的起动、停止与辅助设备的起停控制需满足工艺流程要求的逻辑联锁关系。

冷水机组的起动流程为：冷却塔风机起动→冷却水泵起动→冷冻水泵起动→冷水机组起动。

冷水机组的停机流程为：冷水机组停机→冷冻水泵停机→冷却水泵停机→冷却塔风机停机。

冷水机组的起动与停机流程正好相反。冷水机组具有自锁保护功能。冷水机组通过水流开关监测冷却水和冷冻水回路的水流状态，如果正常，则解除自锁，允许冷水机组正常起停。

（2）备用切换与均衡运行控制

制冷站水系统中的若干设备采用互为备用方式运行，如果正在工作的设备出现故障，首先将故障设备切离，再将备用设备接入运行。

为使设备和系统处于高效率的工作状态，并有较长的使用寿命，就要使设备做到均衡运行，即互为备用的设备实际运行累积时间要保持基本均衡，每次起动系统时，应先起动累计运行小时数少的设备，并能为均衡运行进行自动切换，这就要求控制系统对互为备用的设备有累计运行时间统计、记录和存储的功能，并能进行均衡运行的自动调节。

（3）冷水机组恒流量与空调末端设备变流量运行的差压旁路调节控制

冷水机组设有自动保护装置，当流量过小时，自动停止运行。在冷水机组不适宜采用变流量方式，但对于两管制的空调系统，通过调节空调末端的二通调节阀，系统末端负荷侧的水流量产生变化。在冷冻水供水、回水总管之间设置旁路，在末端流量发生变化时，调节旁通流量来抵消末端流量的改变对冷水机组侧冷冻水流量的影响。旁路主要由旁路电动两通阀及压差控制器组成。通过测量冷冻水供回水间的压力差来控制冷冻水供水、回水之间旁路电动二通阀的开度，使冷冻水供/回水之间的压力差保持常量，来达到冷水机组侧的恒流量方式，这种方式叫差压旁路控制。差压旁路调节是两管制空调水系统必须配备的环节。

（4）两级冷冰水泵协调控制

如果冷冻水回路是采用一级循环泵的系统，一般使用差压旁路调节控制方案来实现冷冻水回路冷水机组一侧的恒流量与空调末端一侧的变流量控制。当空调系统负荷很大、空调末端设备数量较多，且设备分布位置分散，冷冻水管路长、管路阻力大时，冷冻水回路就必须采用两级泵才能满足空调末端对冷冻水的压力要求。

采用两级冷冻水泵工作的情况如图 10-18 所示。一级冷冻泵在冷冻站的回水一侧（集水器一侧），二级冷冻水泵在冷冻站的送水一侧（分水器一侧），为降低电耗，对于一、二级冷冻水泵群组也要进行协调控制。

（5）冷水机组的群控节能

制冷系统由多台冷水机组及辅助设备组成，在设计制冷系统时，一般按最大负荷情况设计冷水机组的总冷量和冷水机组台数，但实际情况运行一般都与最大负荷情况有较大偏差，对应于不同的以及变化的负荷，通过冷水机组的群控实现节能运行。

1）冷冻水回水温度控制法。冷水机组输出冷冻水温度一般为 7℃，冷冻水在空调末端负载进行能量交换后，水温上升。回水温度基本反映了系统冷负荷的大小，根据回水温度控制调节冷

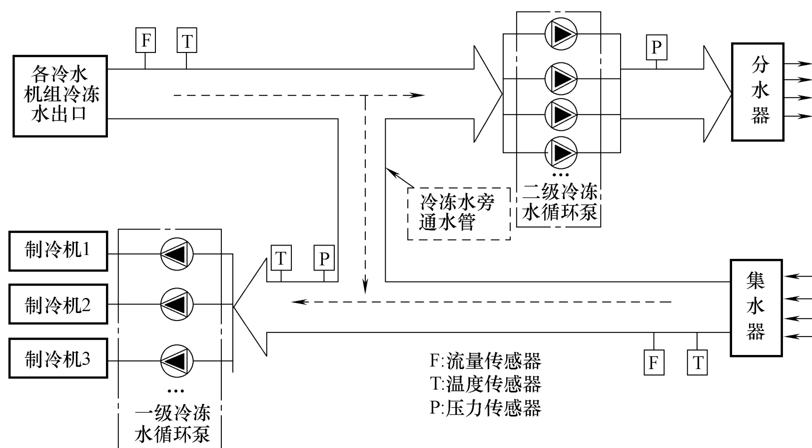


图 10-18　两级冷冻水泵协调控制的系统原理图

水机组和冷冻水泵运行台数，实现节能运行。

2）冷量控制法。使用一定的计量手段根据回水温度与流量求出空调系统的实际冷负荷，再选择匹配的制冷机台数和冷冻水泵运行台数投入运行实现冷水机组的群控和节能。

在根据实际的冷负荷对投入运行的冷水机组与冷冻水循环水泵的台数进行调节时还要同时兼顾设备的均衡运行。

（6）膨胀水箱与水箱状态监控

膨胀水箱作为制冷系统中的辅助设备发挥着这样的作用：当冷冻水管路内的水随温度改变相应的体积也产生改变，膨胀水箱与冷冻水管路直接相连，当水体膨胀体积增大时，一部分水排入膨胀水箱；当水体积减小时，膨胀水箱中的水可对管路中的水进行补充。

补水箱用来存放经过除盐、除氧处理的冷冻用水，当冷冻水管路中的冷冻水需要补充时，补水泵将补水箱中的存储水泵入管路。补水箱中设置液位开关对其运行控制，当水位低于下限水位时进行补充，达到上限水位时停止补充防止渗流。

（7）冷却塔的节能运行控制内容

冷水机组的冷却用水由于带走了冷凝器的热量温度升高至设计温度 37℃（从冷水机组出口），送出的高温回水（37℃）在送至冷却塔上部经过喷淋降温冷却，又重新循环送至冷水机组，这个过程循环往复进行。

来自冷却塔的冷却水进水，设计温度为 32℃，经冷却泵加压送入冷水机组，与冷凝器进行热交换。

为保证冷却水进水和冷却回水具有设计温度，就要通过装置对此进行控制。冷却水进水温度的高低基本反映了冷却塔的冷却效果，用冷却进水温度来控制冷却塔风机（风机工作台数控制或变速控制）以及控制冷却水泵的运行台数，使冷却塔节能运行。

利用冷却水进水温度控制冷却塔风机运行台数，这一控制过程和冷水机组的控制过程彼此独立。如果室外温度较低，从冷却塔流往冷水机组的冷却水经过管道自然冷却，即可满足水温要求，此时就无需起动冷却塔风机，也能达到节能效果。

2. 制冷系统监测点

（1）设备运行状态监控

设备运行状态监控主要包括以下一些内容：

1）冷水机组运行状态。运行状态信号取自冷水机组控制器（柜）对应运行状态输出触点

（或主接触器辅助触点）。

2）冷冻水泵起停状态。该运行状态信号取自冷冻水循环泵配电箱接触器辅助触点。

3）冷却水泵起停状态。此信号从冷却水循环泵配电箱接触器辅助触点取出。

4）冷却塔风机起停状态监控。监控信号从冷却塔风机起停状态监控配电箱接触器辅助触点取出。

5）水流开关状态监测。取自水流开关状态输出点。

（2）参数监控点和故障监控

这些参数可以是水位、流量、温度和压力等。

1）膨胀水箱高低水位监测。信号取自补水箱高低水位监测传感器输出，如使用液位开关、水位高限、低限、溢流位设置等。

2）冷却塔高低水位监测。信号取自冷却塔高低水位监测输出点，如使用液位开关、设置水位高/低限。

3）冷冻水供、回水温度检测。信号取自安装在冷冻水管路上的供、回水温度传感器输出。

4）冷冻水流量检测。信号从安装在冷冻水管路上的流量传感器输出，如使用电磁流量计。

5）冷冻水供、回水压力（或压差）检测。信号取自安装在冷冻水管路上供、回水压力传感器或压差传感器输出，如采用水管或液压传感器，并安装在集水器入口、分水器出口、冷冻水管道附近。

6）冷却水供、回水温度检测。检测信号从安装在冷冻水管路上的供、回水温度传感器的输出。

7）冷水机组起停控制。从 DDC 数字输出口（DO 口），到冷水机组控制器起停远程控制输入点。

8）冷冻水泵起停控制。从 DDC DO 口输出到冷冻水配电箱接触器的控制回路。

9）冷却水泵的起停控制。可从 DDC 的 DO 口（数字输出口）控制冷却水泵配电箱接触器控制电路。

10）冷却水塔水风机起停控制。由 DDC 的 DO 口接入冷却水塔风机配电箱接触器控制回路。

11）冷水机组冷冻水进水电动碟阀。从 DDC 的 DO 口输出到冷水机组冷冻水入口电动碟阀开关控制输入回路。

12）冷水机组冷却水进水电动碟阀。从 DDC 的 DO 口输出到冷水机组冷却水入口电动碟阀开关控制输入回路。

13）冷却塔进水电动碟阀。从 DDC 的 DO 口输出到冷却塔冷却水入口电动碟阀开关控制回路。

14）压差旁路两通阀调节控制。从 DDC 的 AO 口（模拟输出口）输出到压差旁路两通阀驱动器的控制回路。

在系统设计中还包含：手动和自动控制的切换线路设计；设备故障维修/更换等退出自动控制状态的线路设计。

3. 制冷系统设备控制

通过对制冷系统中各相关设备运行状态参数检测传感器对相关物理量的检测，BAS 通过中央监控管理系统和控制现场设备 DDC，对制冷系统的运行进行全面的监控和管理。

在 BAS 对制冷系统进行监控管理的软硬件系统设计、设置时，要解决好以下问题：冷水机组与辅助设备的联锁控制；设备故障报警/手动/自动切换控制，均衡策略运行控制；冷水机组侧的恒流量与空调末端设备变流量运行的控制策略、规律与具体实现方式。

（1）冷水机组与辅助设备的自锁、互锁控制

制冷系统的起停顺序有严格的对应关系。

起动顺序：冷却塔风机→冷却水泵→冷冻水泵→冷水机组。

停机顺序：冷水机组→冷冻水泵→冷却水泵→冷却塔风机。

这种逻辑顺序关系借助于控制软件，并依靠电器开关触点自锁、互锁来实现。

（2） 设备故障报警

设备运行或工作状态出现故障后，监控系统给出报警，并自动停止相关设备的运行，同时对报警信号进行处理与记录。

（3） 备用设备的切换投入

在系统中的设备出现故障，除了报警外，控制系统将故障设备切离，同时将备用设备投入运行，使整个制冷系统正常运行。

（4） 均衡运行的实现

为实现制冷系统中的均衡运行，可通过起停设备的给定策略实施起动来实现。选择起动设备的策略有：

1） 累计运行时间最少的设备优先起动。

2） 当前停止运行时间最长的设备优先起动。

3） 轮流排队起动。

选择停止运行设备的监控策略有：

1）累计运行时间最长的设备优先停止运行。

2）当前运行时间最长的设备优先停止运行。

3）轮流排队停止运行。

在工程实际当中，可采用单一策略，也可采用多种策略的组合。

（5） 制冷系统的节能运行

现代建筑中的空调系统能耗在建筑能耗中占有相当高的比例，高达 50 ~ 60%，其中冷热源设备和水系统的能耗又在空调系统总能耗中占有 80% ~ 90% 的比重，因此对于冷热源设备及水系统的节能运行控制，意义重大。制冷系统中的冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔风机都是主要耗能设备，制冷系统的运行节能控制的内容主要是以上这些设备的单项节能及协调运行中的系统节能。

制冷系统的节能运行控制主要采用以下一些措施：

1） 根据具体的热负荷变化规律制定科学合理的设备运行时间表。由于建筑物内企业的工作时间、不同季节时间段、气候的变化等多种因素，制冷系统的热负荷呈现规律性的变化，根据这些变化规律制定制冷设备运行时间表，能起到很好的节能效果。

2）制冷机组的节能群控。在有多台机型的制冷系统中，对机组进行策略合理的群控，使空调末端设备通过的冷冻水流量与实际的热负荷进行动态匹配，实现节能运行。

对于单台冷水机组，可以使用调节主机运行状态、调节冷水机组冷却水入口温度来调节冷冻水泵、冷却水泵的能耗。

如上所述，根据空调系统实际的冷负荷来调节制冷机组运行的台数，同时调整制冷机冷却水的温度，使制冷量与实际冷负荷匹配，实现空调系统的节能运行。

3）冷冻水循环泵的节能控制运行。空调冷冻水系统采用一级冷冻水泵和差压旁路调节控制构成冷冻水回路结构时，冷冻水泵为冷冻水提供压力来克服冷冻水传输管路中的阻力，并保证末端设备侧获得足够的压力；通过调节差压旁路的流量，保证末端及空调设备的正常工作。可根据实际空调系统的冷负荷，在满足工作压力、冷冻水流量的情况下调节冷冻水泵运行台数和差压旁路的设定值，使之节能运行。

在冷负荷大的空调系统中，末端空调设备分布范围广，水系统管路长，此时冷冻水系统采用二级冷冻水泵来为系统提供正常工作所需的冷冻水压力。对于这种系统的节能运行，是通过调节二级冷冻水压力和冷冻水泵运行台数来控制的。

4）冷却塔和冷却水泵的经济运行控制。冷水机组的冷却水进口处，由冷却塔循环输入的冷却水温度需满足特定要求。根据冷冻机对冷却水温的要求，通过对冷却塔运行台数的控制，来实现冷却塔出水温度与设定值的匹配。还可以使用调节电动机的转速来实现这种控制。当冷却塔出水温度高于设定值时，可增开一台冷却塔或将冷却塔中风扇的驱动电动机转速提高；如果冷却塔出水温度低于设定值，则将一台冷却塔从运行中切离出来，同时对运行的冷却塔运行参数作适当调节。

在对冷却塔台数的调节控制中，一个重要的因素是室外环境温度。总的来讲，合理地调节投入运行的冷却塔台数、调节冷却塔中风机和冷却水泵的运行台数（或通过调速控制）并辅以转速调节，可较好地实现冷却塔、冷却水泵的节能运行。

4. 制冷站经济运行中的协调控制

制冷机组有较复杂的结构，一般配置有功能很强的监控系统。实现对机组的起停控制、运行参数监测、故障报警、按照一定的控制策略进行经济运行控制，制冷机组还配置有较完善的安全保护设置。

新的制冷机组的控制监测系统一般设置了标准的通信接口，并且支持 BACnet（Building Automation and Control Network，楼宇自控网标准通信）协议和 LonTalk 通信协议。从发展趋势上讲，通过统一的通信协议，使制冷机组通过标准通信接口与 BAS 实现有效的数据通信并进而实现无缝互联，BAS 就可以对制冷机组进行高水平的运行状态控制、运行参数控制、经济运行控制及安全防护。BACnet、LonWorks 网络都是开放性很好的网络系统，而且两者与 Internet、以太网通过网关或中间件技术都能实现良好的互联。

10.3　中央空调热源系统

10.3.1　热网和自备热源

中央空调热源主要指蒸汽或热水。热源可由自备锅炉或城市热网提供。使用直燃型溴化锂机组和风冷热泵机组等热源装置为空调末端设备提供热源。

1. 热网供热

城市热网或工厂、小区自建蒸汽锅炉提供高温蒸汽作热源。蒸汽进入热交换器，释热后冷凝成凝结水，回流到中间水箱，通过水泵送回蒸汽锅炉再加热。

常用热网供给的热水作为空调热源。高温热水经换热器换热后，变成空调热水。空调系统中采用冷、热盘管合用方式，这种方式仅适用于热水作热源的情况，不适合蒸汽。

2. 自备热源装置

自备热源装置有：锅炉和热交换器（换热器）等。

空调系统终端热媒多为 65 ~ 70℃热水，通过热交换器完成将高温蒸汽或高温热水（90 ~ 95℃）变为空调热水。热水泵再将空调热水加压经分水器送至各终端负载，在负载中进行水、气热交换（空气升温调节），水温下降，再回流经集水器进入热交换器再加热。

空调系统的热源主要有两个来源：通过城市热网或使用自备锅炉产生热源。下面仅对电加热的热水锅炉或空调热源锅炉进行讨论。

10.3.2　电热锅炉的运行及控制

1. 电锅炉机组运行状态及参量监控

电锅炉机组运行状态及参量监控的主要内容如下：

1）电锅炉机组运行状态监控，信号取自电锅炉控制器（柜）中主接触器触点的断开与闭合状态。

2）使用水温传感器监测电锅炉机组出口热水温度。

3）监测电锅炉机组出口热水压力。

4）监测电锅炉机组热水流量（可采用电磁流量计）。

5）通过测出电锅炉机组热水流量、分水器进口和分水器出口热水温度可计算出空调末端设备的实际的热负荷。

6）监测锅炉回水干管热水压力。

7）通过对电锅炉机组控制器（柜）的运行状态输出触点的监控，在非正常状态下给出电锅炉机组故障报警。

8）通过对热水泵控制配电箱接触器触点的接通与断开状态监测热水泵起停状态。

9）通过对热水泵配电箱触点闭合/断开状态，监测热水泵故障情况，并自动报警。

10）使用 DDC 的数字出口对电锅炉机组的起停进行控制。

2. 锅炉运行控制及节能

电锅炉系统的运行控制内容主要有：联锁控制、工作设备与备用设备的切换控制和均衡运行控制、节能控制、定时控制与远程控制等。

电锅炉系统起动顺序控制：先行起动热水泵→起动电锅炉。

电锅炉系统停止顺序控制：停运电锅炉→停运热水泵。

在系统运行过程中，出现工作设备故障或损坏时，系统自动将其从主回路中切离，然后将备用设备投入运行。系统始终进行自动均衡运行的控制。

对于电锅炉系统可采用不同的控制方式使其节能运行，具体可使用热水回水温度法和热负荷控制法进行控制。

（1）热水回水温度法

电锅炉输出热水一般为 90～95℃，经交换后输出 60～65℃的热水，经过与输运用目地侧的负荷端进行热交换后，温度降低。回水温度反映了系统热负荷的大小，回水温度高，系统热负荷小，反之热负荷高。通过对锅炉机组的起/停调节以及投入运行的热水泵台数、转速的调节实现节能运行。

（2）热负荷控制法

通过对冷水机组的供/回水温度及回水干管的流量测量值，运算环节计算出实际系统热负荷，依据此热负荷值控制调节电锅炉的起停及投入运行的热水泵台数，达到节能目的。

控制系统对电锅炉按预定的时间运行表进行起停及相关控制，还可以对现场设备进行远程开/关控制。根据实际系统的情况，如电锅炉机组的台数、热水泵和补水泵的台数，排列出数字输入/输出、模拟输入/输出的点数，并依据此来配置 DDC。

10.3.3　热交换器及控制

对于两管制空调末端设备，要求所供热水温度为 65～70℃，但实际上热网或自备锅炉提供的热水大多不能满足这个要求，要使用热交换器（也叫换热器）将温度较高的高温热水转换成满足一定温度要求的空调热水，经热水泵加压再给分水器送至空调末端设备进行热交换；水温下

降后的空调热水回流，回到集水器进入热交换器再次加热，如此循环工作。

对于热交换器的监控控制内容有：

1. 对空调换热系统的运行参量、运行状态监测及控制

如热交换器一次侧热水供、回水的温度监测；热交换器一次侧热水供、回水的压力监测；二次侧热水泵起停状态监控；水流开关状态监控、热水泵起/停控制等。

2. 对热交换系统进行联锁控制

要根据严格的联锁控制关系对热交换系统进行起动顺序控制：起动二次侧热水循环泵→开起一次侧热水/蒸汽阀门→热交换系统的停止顺序控制：关闭一次侧热水/蒸汽阀门→停止二次侧热水循环泵。

3. 运行控制及节能运行

（1）热交换系统的运行控制及节能

系统正常运行要依靠自动控制环节，同时还要兼顾节能运行。可以采用热水回水温度法和热负荷控制法控制系统的节能运行。

从热交换器输出的热水经过空调末端设备，经能量交换后，温度下降，回水温度反映和描述系统的热负荷，依据回水温度作控制参量控制调节热交换器的运行台数和热水泵运行台数及转速，实现节能运行。

热负荷控制法是根据分水器、集水器的供回水温度以及回水干路管道的流量值，可动态计算出空调末端设备的实际热负荷。再根据实际热负荷大小来控制调节热交换器的运行台数和热水泵的运行台数及转速，达到节能运行的目的。

（2）定时运行控制与远程控制

可对热交换器按给定的运行时间表进行运行控制，并能对楼宇内的现场设备（与热交换器相关的设备）进行远程控制。

10.4　新风机组及控制

新风机组自动控制主要由新风阀、过滤器、冷/热盘管、送风机构成。控制系统中的现场设备由 DDC、送风温度传感器、防冻开关、压差开关、电动调节阀、风阀执行器组成。新风机组通常与风机盘管配合使用，主要功能是为各房间提供新鲜空气，满足室内空气的清洁要求。为避免室外空气的温/湿度影响室内空气的温/湿度，将室外空气引入室内之前要进行热湿处理。

一个实际的新风机组如图 10-19 所示。

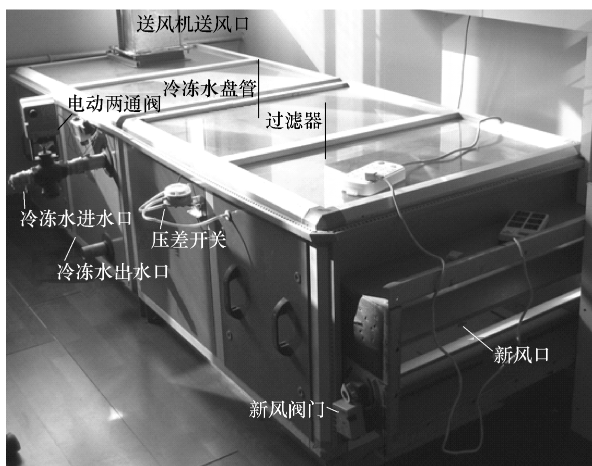


图 10-19　一个实际的新风机组

10.4.1　新风机组的控制原理和运行状态及参量监控

1. 新风机组的控制原理

一个两管制新风机组控制原理如图 10-20 所示。

基本控制过程如下：

1）DDC 按设定时间、送出风机起停信号、新风阀与送风机联锁。当风机起

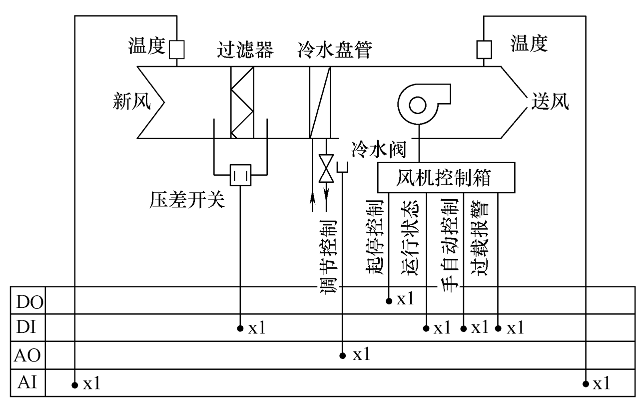


图 10-20　两管制新风机组控制原理图

动运行时，新风阀打开，风机关闭时，新风阀门同时关闭。

2）当过滤器两侧压差超过设定值时，压差开关送出过滤器堵塞信号，监控工作站给出报警信号。

3）温度传感器检测出实测送风温度值，经与 DDC 设定值比较，再经 PID 计算，输出相应的模拟信号，控制水阀门的开度，控制调节温度趋近并稳定在设定值。

4）系统中的湿度传感器对送风湿度进行检测，并与 DDC 设定值比较，经 PID 计算，给出设定的相应模拟调节信号控制加湿阀的开度，控制湿度趋近并稳定在设定湿度上。

5）对送风机的运行状态进行实时监测，此处主要指对手动控制/自动控制/运行/故障状态进行监控。

6）按给定时间表控制风机的起停。

2. 新风机组运行状态及参量监控

新风机组运行状态及参量监控的主要内容有：

1）由安装在新风口的风管式空气温度传感器对新风温度进行监测。

2）由安装在新风口的风管式空气湿度传感器对新风湿度进行监测。

3）从安装在过滤网两侧的压差开关对过滤网两侧压差进行监测。

4）从安装在送风管上的风管式空气温度传感器对送风温度进行检测。

5）从安装在送风管上的风管式空气湿度传感器对送风湿度进行检测。

6）通过对送风机配电柜接触器辅助触点的断通状态监测风机的运行状态。

7）通过对送风机配电柜热继电器辅助触点的断通状态对风机故障进行监测。

8）对送风机进行开关的控制。

9）对新风机风门开度的控制。

10）冷水阀/热水阀开度控制调节。

11）加湿阀门开度控制。

12）通过装置在空调区域的 CO_2 传感器对空气质量进行监测。

13）通过送风管内的风管式风速传感器检测风速。

以上风门与阀门的开度调节可通过 DDC 的 DO、AO 口对驱动器控制电路进行控制。

10.4.2　新风机组运行控制与节能控制

新风机组运行控制与节能控制内容有：新风机组的起动顺序控制及停机顺序控制。

1. 新风机组温度调节

新风机组的主要控制对象是出风口温度或被调节房间内的温度。传感器测出的温度值或房间内温度值传送给 DCC，DDC 将接收到的温度值与设定值比较所得的差值，经由 PID 调节算法处理后调节冷/热水调节阀开度来控制冷冻水（或加热水）流量，使夏季的室内空间温度低于 28℃，冬季高于 16℃。

在新风机组运行中，室外温度变化对于调节系统来讲是一个扰动输入。

2. 新风机组湿度调节

新风机组的出风口（房间）湿度由湿度传感器测出送至 DDC，经与给定值比较所得偏差，由给定算法处理后，调节加湿电动阀开度，控制空调房间内的相对湿度。

3. 新风风门的调节

根据新风的温度和湿度、空调房间的温湿度及焓值计算，还根据具体环境对空气质量的要求，控制调节新风风门的开度，使系统向房间提供满足实际需求的新风，同时节能运行。

4. 空气质量控制

通过安置在空调房间里的空气质量传感器监测室内的 CO_2、CO 真实浓度，并将监测信号输送给 DDC，若超过给定值，则 DDC 输出控制信号，控制新风风门开度增大新风的供给。

5. 起停设备的控制与远程开/关操作

控制新风机组按照给定的运行时间表进行起停，还可在控制中心对新风机组设备及空调机组实施远程控制，如开/关操作。

6. 过滤器堵塞和防冻保护

当过滤器的过滤网出现积灰积尘、堵塞严重，不进行清洗或清理时，就会影响过滤器及整个新风机组的正常工作。通过压差开关监测过滤器两端压差，在压差超过设定值时，给出报警信息。

新风机组中还设置有防冻开关，监测换热器出风侧温度。在室外温度过低，防冻开关监测到的换热器侧温度低于给定值时，关闭风门和风机，防止换热器温度进一步降低。

10.5　空调机组及自动控制

10.5.1　空调机组的安装位置关系

空调机组主要由新风阀、回风阀、排风阀、过滤器、冷/热盘管、送风机组成。控制系统由 DDC、送风温度传感器、送风湿度传感器、防冻开关、压差开关、电动调节阀、风阀执行器等组成。

为节能运行，空调系统运行中要使用一部分回风，同时为满足对室内空气洁净度的要求，还要采用一定量的新风。空调机组的工作主要是对系统中的新风和回风混合后进行热湿处理，再送入到空调房间，调节室内空气参数达到预定要求。

如何处理新风和回风比例关系，使之既满足室内空气洁净度、湿度的要求，同时又能节约运行能耗，这是空调机组必须解决好的问题。

空调机组常要承担若干个房间的空气调节任务，而不同房间可能热负荷、湿度各不相同(热湿特性不同)，还常要求不同房间有不同的调节参数。这使得系统控制过程变得更为复杂。

新风机组工作时，仅考虑和处理室外空气参数变化对调节系统的干扰；而空调机组也同样要受到这类系统外扰动，但除此之外，还有室内人员、设备散热、散湿量变化引起的干扰。调节系统必须有效地应对和处理这些系统外干扰；使被调节空间满足预定的温湿度要求，同时合理地降低运行能耗。

一个实际空调机组的外观如图 10-21 所示。



图 10-21　一个实际空调机组的外观

中央空调机组安装的位置关系如图 10-22 所示。

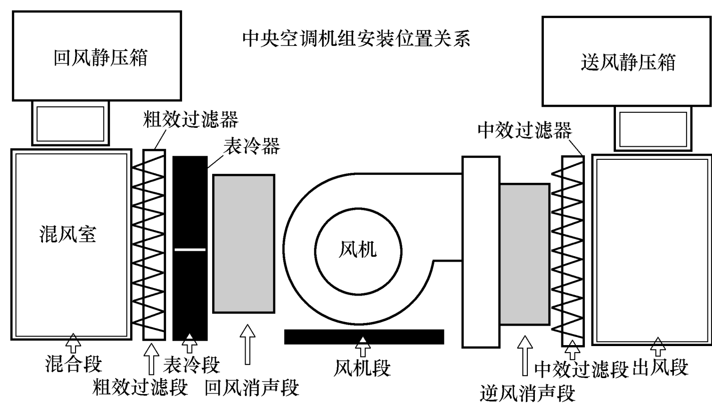


图 10-22　中央空调机组安装的位置关系

空调机组为多个独立的区域供给冷风的情况如图 10-23 所示。

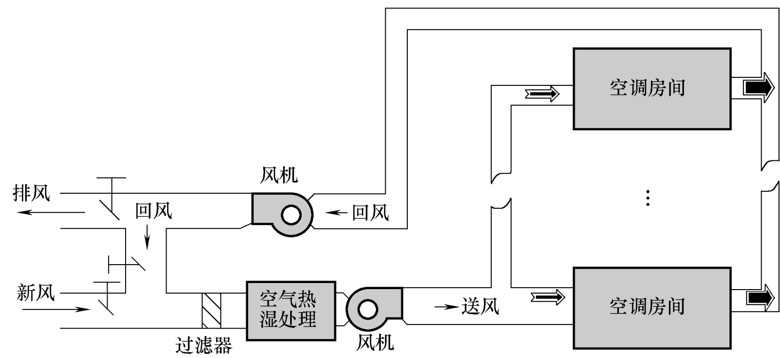


图 10-23　空调机组为多区域供冷

10. 5. 2　四管制空调机组的工作原理

一个典型的四管制空调机组控制原理如图 10-24 所示。这里的“四管制”空调机组是指夏季

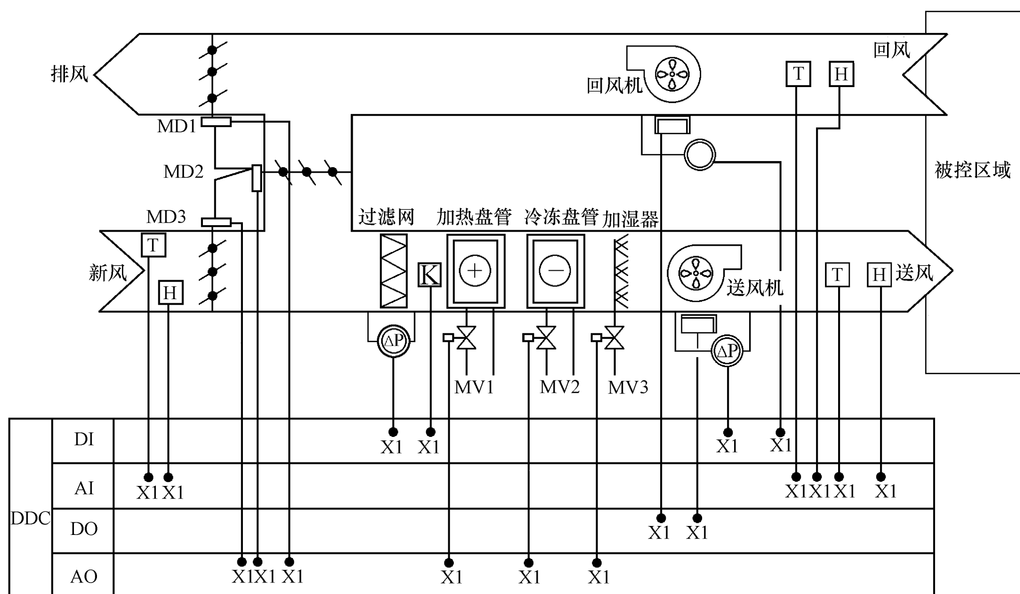


图 10-24　一个典型的四管制空调机组控制原理图

MD1/MD2/MD3—风门执行器　△P—压差开关　K—防冻开关　MV1/MV2—水阀

MV3—加湿器　T—温度传感器　H—湿度传感器

用于制冷的冷冻水盘管用来通过和输运低温的冷冻水；同时还单独设有“热水盘管”用于通过和输运冬季空调系统向空调区域提供热风用的热水。如果表冷器中的盘管在夏季用于通过和输运冷冻水，在冬季用于通过和输运提供热风用的热水，这样的空调系统叫两管制系统。

控制系统的各部分工作情况如下：

1）电动风阀与送风机、回风机的联锁控制。当送风机、回风机关闭时，新风阀、回风阀、排风阀都关闭。新风阀和排风阀同步动作，与回风阀动作相反。根据新风、回风及送风焓值的比较，调节新风阀和回风阀开度。当风机起动时，新风阀打开；风机关闭时，新风阀关闭。

2）当过滤器两侧压差超过设定值时，压差开关送出过滤器堵塞信号，并由监控工作站给出报警信号。

3）送风温度传感器检测出实际送风温度，送往 DDC 与给定值进行比较，经 PID 计算后输出相应的模拟信号控制水阀开度，直到实测温度非常逼近和等于设定温度。

4）送风湿度传感器检测出送风湿度实际值，送往 DDC 后与设定值比较，经 PID 计算后，输出相应的模拟信号调节加湿阀开度，控制房间湿度在一定范围内。当加湿器为开关量时，则输出起/停控制信号。

5）由设定的时间表对风机起/停进行控制，并自动对风机手动/自动状态、运行状态和故障状态进行监测；对送风机、回风机的起/停进行顺序控制。

6）在冬季温度很低时，一般设为 5℃，防冻开关发出控制信号，新风阀关闭，防止盘管冻裂。当防冻开关正常工作时，要重新打开新风阀，恢复正常工作。

10.5.3　定风量空调机组运行状态及参量监控

自动控制系统对定风量空调机组进行以下运行参量及运行状态进行监控：

1）从室外的温度传感器和新风口上的风管式温度传感器采集室外温度和新风温度。

2）从室外的湿度传感器和新风口上的风管空气湿度传感器采集室外湿度和新风湿度。

3）从安装在过滤网上的压差开关监测过滤网两侧压差。

4）从安装在送风管和回风管上的风管空气温度传感器采集送/回风温度。

5）从安装在送风管和回风管上的风管空气湿度传感器采集送/回风湿度。

6）使用安装在空调区域或回风管上的空气质量传感器（如 CO_2 传感器）进行空气质量监测。

7）采集由送风管上的风速传感器测出的风速对送风风速进行监测。

8）自安装在送风管表冷器出风侧的防冻开关采集防冻开关状态监测信号（在冬季温度低于0℃的北方地区使用）。

9）通过送/回风机配电柜热继电器辅助触点处的开闭状态采集到送/回风机故障状态的监测。

10）通过对送/回风机配电柜热继电器辅助触点，对送/回机运行状态进行监测。

11）从 DDC 的 DO 口到新风口风门驱动器控制电路，调节控制新风口风门开度。

12）从 DDC 的 DO 口到回风/排风风门驱动控制电路，控制调节回风/排风风门开度。

13）从 DDC 的 AO 口输出冷/热水二通调节阀门驱动器控制电路控制调节冷热水二通调节阀门开度。

14）从 DDC 的 AO 口输出到冷/热水阀门的驱动控制器控制输入口，控制调节冷/热水阀门开度。

15）从 DDC 的 AO 口到加湿二通调节阀驱动器控制输入口，控制调节加湿阀门开度。

16）从 DDC 的 DO 口到送/回风机配电箱接触器控制回路，进行送/回风机起停控制。

10.5.4 定风量空调机组的运行控制与节能运行

1. 联锁控制

定风量空调机组起动时的联锁控制顺序为：新风风门→回风风门→排风风门开启→送风机起动→回风机起动→冷热水调节阀起动→加湿阀开启。

定风量空调机组停机顺序控制：关闭加湿阀→关闭冷热水阀→送风机停机→新风风门关闭→回风风门关闭→排风风门关闭。

2. 定风量空调机组的温度调节与节能运行

定风量空调机组中，用回风温度作为被调参数，由回风温度传感器测出回风温度量传送给DDC，DDC 计算回风温度与设定温度的差值，按 PID 调节规律处理并输出调节控制信号。

通过调节空调机组冷热水阀门开度调节冷/热水量，使被控区域的温度保持在设定值。室外温度变化通过新风温度来反映，新风温度值输入给 DDC 进行处理后控制相应的调节阀开度，进而达到空调区域的温度控制。

3. 空调机组回风湿度控制

由回风湿度传感器测出的回风湿度量值信号送回 DDC，通过与给定值比较后产生一个偏差，经由给定算法（PI 规律调节）处理后，控制调节加湿电动阀开度，使被调节区域的空气湿度满足设定要求。

4. 新风风门、回风风门及排风风门的控制

由新风温/湿度传感器和回风温/湿度传感器测出的温/湿度信号量值传送给 DDC，DDC 根据这些数据进行焓差计算，按回风和新风的焓值比例及新风量的需求，调节新风风门和回风风门开度，同时使系统在趋近较佳的新风/回风比例上节能运行。

5. 过滤器压差报警及机组防冻

在过滤网出现堵塞严重、积灰较严重的情况下，装置在过滤器上的压差开关报警。冬季时，还需要对机组进行防冻监测和控制。

6. 空气质量控制

使用 CO、CO_2 等气体传感器监测室内空气质量，DDC 接收到这些测出量后，进行对比运算，再输出控制信号调节新风风门开度，通过调节新风量供给来控制空调区域的空气质量。

7. 空调机组的定时运行和远程控制

通过控制系统，按给定的时间表对空调机组进行定时起/停控制，并能对相关设备进行远程控制。

10.6　风机盘管系统及控制

10.6.1　风机盘管空调系统的工作原理

1. 风机盘管组成

风机盘管主要由风机，换热盘管和机壳组成，按风机盘管机外静压可分为标准型和高静压型，风机一般采用双进风前弯形叶片离心风机，电动机采用电容式 4 极单相电动机，三挡转速。

2. 风机盘管空调系统的工作原理

风机盘管是中央空调系统使用最广的末端设备，风机盘管的全称为中央空调风机盘管机组，房间局部吊顶的风口就隐藏着风机盘管，它不停地为我们带来舒适的温度。

风机盘管控制多采用就地控制的方案，分简单控制和温度控制两种：

1）风机盘管简单控制：使用三速开关直接手动控制风机的三速转换与起停。

2）风机盘管温度控制：使用温控器根据设定温度与实际检测温度的比较、运算，自动控制电动二/三通阀的开闭，风机的三速转换，或直接控制风机的三速转换与起停，从而通过控制系统水流或风量达到恒温。

使用风机盘管机组不断地循环调节室内空气，通过盘管和周围环境的热交换实现空气的冷却或加热，以保持房间要求的温度和一定的相对湿度。盘管使用的冷水或热水，由集中冷源和热源供应，与此同时，由新风空调机房集中处理后的新风，通过专门的新风管道分别送入各空调房间，以满足空调区域对新风的需求。

风机盘管的工作情况如图 10-25 所示。

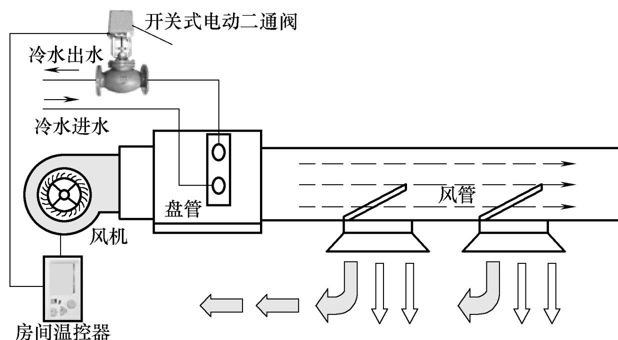


图 10-25　风机盘管的工作情况

风机盘管空调系统具有布置和安装方便、占用建筑空间小、单独调节好等优点，广泛用于温、湿度准确度要求不高、需要进行空气调节的房间数量多、房间空间较小和需要单独调节控制的环境中。

和中央空调系统的空调机组相比，风机盘管工作原理较为简单。风机盘管就像是一台能够送出用户需求温度的冷风或热风的大型电扇。风机盘管是空调系统的末端装置，风机盘管一般均可以调节其风机转速（或通过旁通阀调节经过盘管的水量），从而调节送入室内的冷/热量，实现对室内温度的调节。

一个两管制冷/热合用的风机盘管工作控制原理如图 10-26 所示。

图 10-26 中的风机盘管两管制温度控制系统由温度控制器 TC-1、电动阀 VA-1 组成。控制器 TC-1 的作用是检测室内的温度并与控制器设定温度相比较，并根据比较结果对电动阀 VA-1 进行

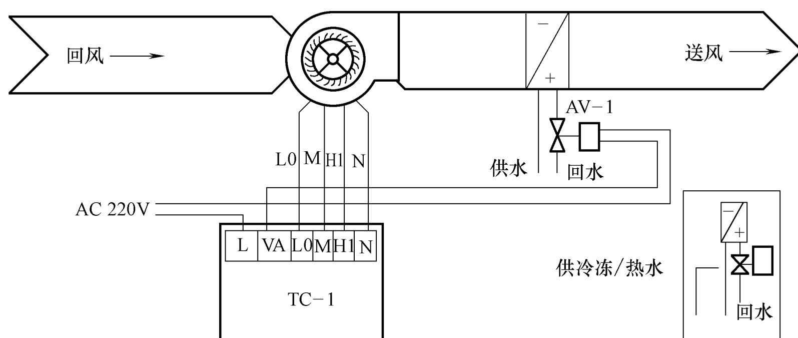


图 10-26 一个两管制冷/热合用的风机盘管工作控制原理图

通、断控制，调节冷冻水或热水的输运通道开通或关闭，控制送出的冷风或热风温度，使房间温度保持恒定。

温度控制器 TC-1 通过传感器测得室内温度，与设定温度比较，当室内需要冷风或热风时，控制器打开电动阀和风机，向室内供冷或供热。

现在工程中使用的独立运行风机盘管的温控器一般没有网络通信功能，就是说无法进行网络控制或远程控制。温控器的设定温度一般在 5～30℃ 范围内可调。通过操作温控器上的“高、中、低”三挡开关，来控制风机盘管内的风机按“高、中、低”三种转速运行，在不同挡转速下，调节送出冷风或热风的风量实现空调房间内温度的调节。

风机盘管工作在夏季模式时，空调水管输运冷冻水，温控器选择开关应拨在“COOL（冷）”的挡位。当空调区域的温度升高并超过设定点温度时，恒温器的触点接通，电动二通阀被打开、风机运行送风，风机盘管对室内空气制冷；当室温在冷气的作用下降低并低于设定温度时，恒温器的触点断开，电动阀被关闭，风机停止运行，风机盘管停止对室内空气制冷。这样往复循环，使室温保持在一定范围内。

风机盘管的冷/热量可通过控制盘管水量、气流旁通、风机转速或三者的结合来控制。冷/热量的控制可手动也可采用自动模式。

3. 风机盘管工程应用中的冷量风量校核

风机盘管可以自成单元，调节灵活。风机盘管为三挡变速，且水路系统可根据用户室温设定情况，采取冷热水自动控制温度调节阀调节，从而使各房间可独立调节室温，以满足不同空调使用客户的需求，房间无人使用时可手动关机或自动定时关机，可根据不同用户的使用需求来配置风机盘管机组和进行个性化调节控制，使整体系统的运行费用降低。

使用风机盘管对于分区控制较为容易，可以按房间的朝向、楼层、用途、使用时间等分成若干区域，按不同的客户使用需求进行分区控制，避免了大风道系统依靠集中控制的不足。

风机盘管机体小，布置灵活、安装方便、占用建筑空间较少，便于配合内装施工。根据业主的不同需求，结合设计图样选择进行工程实施，要充分考虑冷量和风量的校核。

（1）冷量的校核

怎样选择风机盘管产品？主要是根据空调房间的计算冷负荷来进行，但同时要结合不同的新风供给方式来综合考虑，因为不同的新风供给方式能够导致风机盘管的计算负载冷量不同。如果采用新风直接通过外墙送至空调房间的方式，进入房间内的新风没有经过热湿处理，此时风机盘管的计算冷量 = 室内冷负荷 + 新风计算冷负荷；采用独立的新风系统时，则风机盘管的计算冷量 = 室内冷负荷。风机盘管的冷量过高，导致供冷能力过大，机组开动率低，换气次数减少，空气质量差，室温梯度大，系统容量和设备投资大，空调能耗加大，空调效果降低。风机盘管的冷

量过低，会形成“小马拉大车”的情况。

（2）风量校核

按房间空气品质要求校核换气次数。换气次数越多，则空气品质越好，如果空调区域中感受有异味、气闷的现象，标志着风机盘管系统换气次数少，风量校核没有做好。

4. 风机盘管工程应用中的送、回风方式

在风机盘管工程应用中，送、回风方式的选择对机组使用效能也有一定影响。送、回风方式直接影响空调房间内的气流组织，影响到空调房间的温度场、速度场的均匀性和稳定性，直接影响空气调节效果。

应根据实际的建筑格局，房间的结构形式，进深、高度等情况，选择中挡风量、风速指标来相应选择风机盘管型号。

10.6.2　风机盘管加新风系统

风机盘管加新风系统是实际工程中广泛使用的一种空调末端组织方式，该方式采用新风系统与风机盘管组合的形式，解决了仅使用风机盘管不能解决新风输运的不足。

1. 新风系统

新风系统就是在 24h 不开窗的前提下仍然能够引入室外新鲜空气，排除室内浑浊有害的空气；新风系统由风机、进风口、排风口及各种管道和接头组成。安装在吊顶内的风机通过管道与一系列的排风口相连，风机起动，室内受污染的空气经排风口及风机排往室外，使室内形成负压，室外新鲜空气便经进风口进入室内，从而使室内人员可呼吸到高品质的新鲜空气，这就是新风系统。

正负压不均衡导致空气流动，在密闭的空调区域使用专用设备向室内送新风，同时将室内的浑浊气体输运到室外进行空气循环搬移，满足室内新风换气的需求。

2. 风机盘管加新风系统优缺点

风机盘管加新风系统由两部分组成：中央空调风机盘管和新风系统，新风系统负担新风负荷以满足室内空气质量的需求，风机盘管加新风系统是水系统空调中一种重要的形式，是建筑中广为采用的空调形式。

与全空气系统相比，风机盘管加新风系统优点如下：

1）控制应用灵活，可以根据不同空调区域的具体情况灵活配置安装，可灵活地调节不同空调区域的温度，根据房间的使用状况确定风机盘管的起停；

2）风机盘管机组体型小、占地少、布置和安装方便，适合新老建筑内的使用；

3）根据建筑内不同区域对冷量的需求不同、采用的调节方式要求不同，容易实现系统分区控制，冷热负荷能够按房间朝向、使用目的、使用时间等把系统分割为若干区域系统，实施分区控制。

与全空气系统相比，风机盘管加新风系统也有以下一些明显不足：

1）由于机组分散设置，设备台数多，维修保养和管理工作量大；

2）由于没有采取任何过滤措施，导致室内空气品质变差，很难进行二级过滤并较易发生凝结水渗漏；

3）风机盘管机组方式本身解决新风量困难，由于机组风机的静压小，气流分布受限制，适用于进深小于 6m 的房间。

如上所述，正确认识风机盘管加新风系统的优缺点，进行合理的设计和设备选择、正确的施工安装来减轻风机盘管加新风系统固有缺陷产生的负面作用。

3. 部分空调系统末端设备的配置

如前所述，空调机组、新风机组、风机盘管和变风量空调机组是常见的空调系统末端设备，冷冻站生产制备冷冻水输运到远端建筑中的这些空调系统的末端作为冷源。空调系统末端设备和制冷站之间的配置关系如图 10-27 所示。

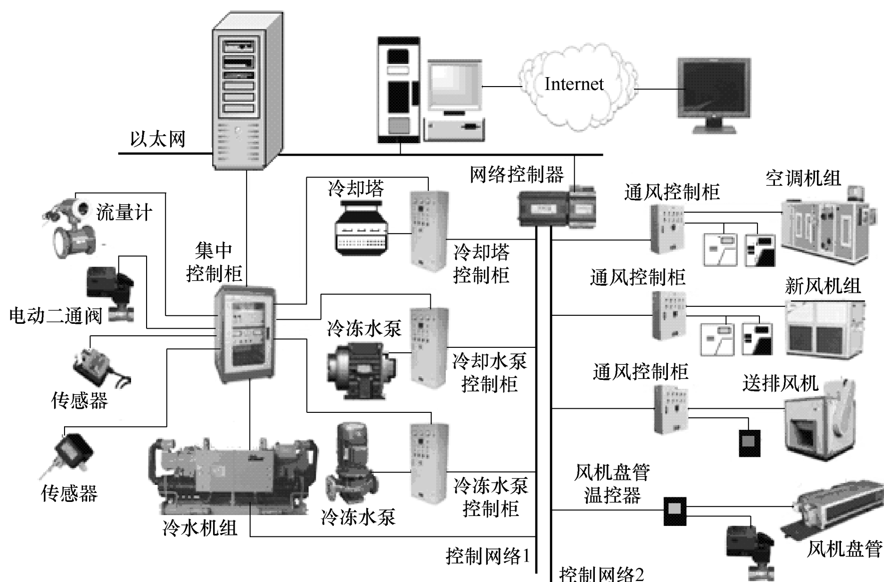


图 10-27　空调系统末端设备和制冷站之间的配置关系

10.7　变风量空调系统

10.7.1　变风量空调系统简介

变风量（VAV）空调系统是一种节能效果显著的空调系统。定风量（CAV）空调系统的送风量是不变的，并且房间最大热湿负荷确定送风量，但实际上房间热湿负荷不可能经常处于最大值状态，而是全年的大部分时间都低于最大值，因此产生不必要的较大能耗。VAV 空调系统是通过送入各房间的风量来适应负荷变化的系统。当室内空调负荷改变成室内空气参数设定值变化时，空调系统自动调节进入房间内的风量，将被调节区域的温、湿度参数调整到设定值。送风量的自动调节可很好地降低风动机消耗，降低空调系统运行能耗。

VAV 空调技术于 20 世纪 90 年代诞生在美国，VAV 空调系统追求以较低的能耗满足室内空气环境的要求。VAV 空调系统出现后并没有得到迅速的推广和应用，当时美国占主导地位的仍是 CAV 系统加末端再加热和双风道系统。西方 70 年代爆发的能源危机使 VAV 空调系统在美国得到广泛应用，并已成为美国空调系统的主流，同时在其他国家也相继进入迅速发展的阶段。

据有关文献报道 VAV 空调系统与 CAV 空调系统相比，大约可以节能约 30% ~70%，对不同的建筑物同时使用系数可取 0.8 左右。

VAV 空调系统的灵活性较好，易于改、扩建，尤其适用于格局多变的建筑，如商务办公楼，当室内参数改变或重新布置隔断时，可能只需更换支管和末端装置、移动风口位置即能适应新的负荷情况。

由于系统造价较高，控制系统复杂，VAV 空调系统在我国的推广应用受到一定的限制。但

随着建筑智能化技术和楼宇自控技术的不断发展，以及低温空调和冰畜冷技术的研究应用，控制和成本较高的这两个影响 VAV 空调系统发展的关键问题有望解决，因此在我国推广应用 VAV 空调系统已形成一个普及层面较大的应用热点。

VAV 空调系统采用一次回风式变风量集中空调系统，每个房间设一个或多个变风量送风口，一个回风口。房间温控器控制末端装置送风量，自控系统根据各送风口的送风量调节风机转速，实现节能运行。

尽管 VAV 空调系统有很多优点，但也应客观地认识到系统存在着一些技术需要改进的方面，如：

1）缺少新风，室内人员感到憋闷；

2）房间内正压或负压过大导致室外空气大量进入，房门开启困难；

3）室内噪声较大；

4）系统运行的稳定性不是很高；

5）系统的初投资较大；

6）VAV 空调系统比 CAV 空调系统多了一些末端装置和风量调节功能，使得从方案设计到设备选择、施工图设计及施工调试与 CAV 空调系统都有了很大的不同。

10.7.2　VAV 空调系统组成

VAV 空调系统由 VAV 空调机组和 VAV 末端两部分组成，VAV 末端也叫 VAVBOX。VAVBOX 根据空调区域的热负荷，通过调节风门开度来控制送风量。VAV 空调机组则根据各 VAVBOX 的需求，通过风机变频调速来控制总的送风量。

一种 VAV 空调机组和 VAVBOX 的外观如图 10-28 所示。

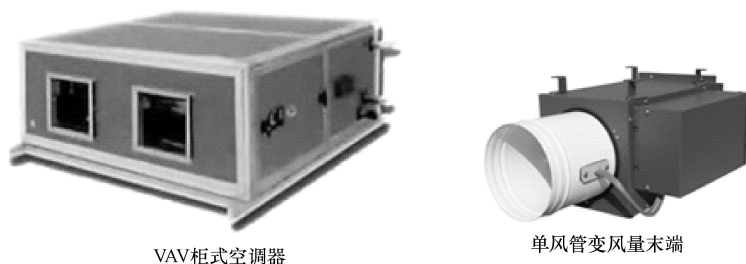


图 10-28　一种 VAV 空调机组和 VAVBOX 的外观图

10.7.3　VAV 空调机组的末端装置（VAVBOX）

VAV 空调机组中的送风机采用变频调速方式，送入每个房间的风量由变风量末端装置即 VAVBOX 控制，每个 VAVBOX 可根据房间的布局设置几个送风口。VAVBOX 的使用如图 10-29 所示。

室内温度通过 VAVBOX 设在房间的温控器进行设定。当空调区域的热负荷变化，VAVBOX 的监测控制 DDC 根据实际温度检测值，通过计算确定送入房间的风量。当室内温度高于设定值时，VAVBOX 将开大风阀提高送风量，此时主送风道的静压将下降，并通过静压传感器把实测值输入到现场 DDC，DDC 将实测值与设定值进行比较后，控制变频风机提高送风量，以保持主送风道的静压。如果室内温度低于设定值，VAVBOX 将减小送风量。

VAVBOX 和变频送风机的控制过程中，控制对象为室内温度、主送风道静压，检测装置为静压传感器，调节装置是现场 DDC，执行器是变频风机，干扰量是 VAVBOX 风阀开度、空调

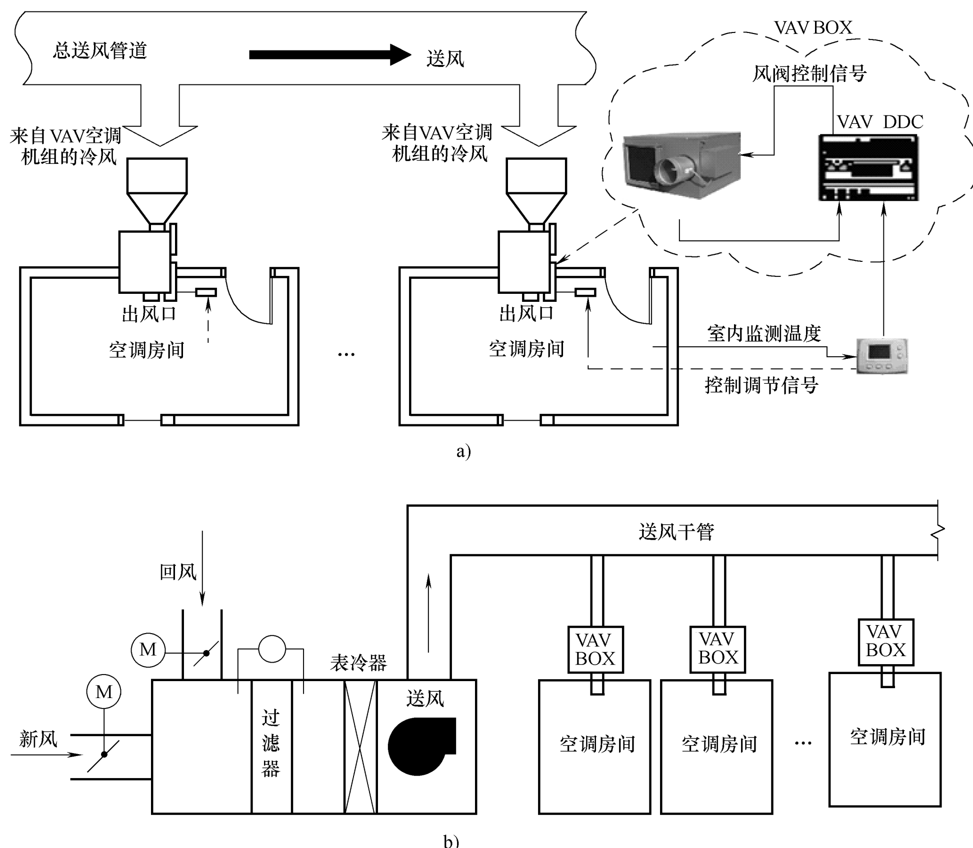


图 10-29　VAVBOX 的使用

负荷。

由于 VAV 空调系统在调节风量的同时保持送风温度不变，因此在实际运行过程中必须根据空调负荷合理地确定送风温度。例如夏季，当送风温度定得过高，空调机组冷量不能平衡室内负荷时，空调机组可能大风量工频运转，此时起不到节能效果。空调机组的送风温度可以通过现场 DDC 进行设定，并且通过控制空调机组回水电动阀，对送风温度进行有效的控制。

DDC 通过监测新风与回风的焓值，确定新风与回风的混合比。在保持最小新风量的同时充分利用回风，以减少制冷机组能耗。

空调系统的设计负荷一般是充分考虑容量冗余的最大负荷。采用 VAV 空调系统可以较好地进行容量冗余动态跟踪调节，取得良好的节能效果。

VAV 空调系统由共用或分立的送风系统、风温控制器及辅助加热系统组成。变风量调节是通过改变送风量达到控制房间温度的一种控制策略。室内参数改变或重新隔断，只需更换支管、末端装置、移动风口位置；采用一次回风或多变量集中空调系统，每个房间设一个或多个变风量送风口，一个回风口。房间温控器控制末端装置送风量，根据各送风口的送风量调节风机转速，实现节能运行。

10.7.4　VAV 空调系统基本原理

VAV 空调系统的能量平衡方程式如下：

$$G = \frac{Q}{1.01(T_n - T_0)}$$

式中　G——送风量；

Q——负荷；

T_n——室内温度；

T_0——送风温度。

从上式可知：当负荷 Q 或室内温度 T_n 发生改变时，如果保证送风量 G 不变，必须调节送风温度 T_0。当保证送风温度 T_0 不变（或微调），空调区负荷 Q 变化随之调节送风量 G，都能保持空调系统的能量平衡。

要维持空调区的温度，就需要在放热负荷及与该负荷匹配的送风量之间建立某种平衡。当空调区负荷变化时，如果要保持这种平衡就必须面临两种选择：改变送风温度（定风量）或者改变送风量（变风量）。在部分负荷情况下，两种控制策略可以达到相同的控制效果。

VAV 空调系统一般由共用或分立的送风系统、风温控制器及辅助加热系统组成。变风量调节是通过改变送风量来达到控制空调区温度的一种控制策略。

在 VAV 系统中，送风温度不变，送风量与空调负荷成正比地进行供给，空调负荷减少，送风量也按线性方式减小，实现动态经济运行。

这种系统的主要工作特点：送风温度不变，通过改变风量来满足空调区冷热负荷的需求，通过调节送风机转速来改变送风量，这种转速调节是通过变频调速来实现的。

传统的中央空调系统，在诸如低压单区、多区和末端再热系统及高压双管诱导式系统中大都采用定风量变风温的方式。如一个系统，送风量始终为 10000m^3/h，而送风温度冬天在 21～37.8℃、夏天在 12.8～25.6℃变化，以此来满足不同的环境负荷需求。

要在一定的空间内控制温度，必须在空间热负载和送风体积温度之间取得平衡。这样就可通过改变送风温度或送风体积两种方式，来满足空间热负载变化的需要。

与传统中央空调系统不同，VAV 空调系统在热负载变化时，仍采取恒温送风，通过改变送风量来满足房间温度控制的需要。例如：一个设计风量为 4000m^3/h 的 VAV 空调系统，可在 1000～4000m^3/h 的风量范围内提供恒温为 13℃的冷风。

当节能要求较高时，送风温度也是可以改变的。在一般负荷下，VAV 空调系统的平均风量是峰值时的 70%。内区接近于 80%，周边区域由于室外阳光辐射变化不一。

VAVBOX 起到了改变风量的功能，从 100% 的开启到完全关闭。调节范围的选择需同时兼顾室内热舒适状况、通风率及风温和湿度的要求。一个典型的 VAVBOX 的转换率一般为 1.0～0.25（即 100%～25% 的风量）。

VAV 空调系统组成：VAV 空调机组 + VAVBOX。在 VAV 空调系统中，末端系统的组成方式不同，对应地组成具有不同结构的 VAV 空调系统，如单风管 VAV 空调系统、单风管再加热 VAV 空调系统、单风管送回风机联动 VAV 空调系统、单风管旁通式 VAV 空调系统等。

10.7.5　VAV 空调系统分类

1. 单风管 VAV 空调系统

单风管 VAV 空调系统的结构原理如图 10-30 所示。

在每个空调房间入口处的送风支管上装置了送风量调节装置，VAV 空调机组根据空调系统所有末端用户所需实际总风量通过调节风机转速调节风机风量供给。VAVBOX 根据空调区温度的变化调节被控区域的送风量，以维持室内温度的平衡稳定。根据送风风道静压的变化控制变频器驱动的风机转速；根据新风量需求对新风、回风和排风扇进行联动控制，调节新风、回风风量比。

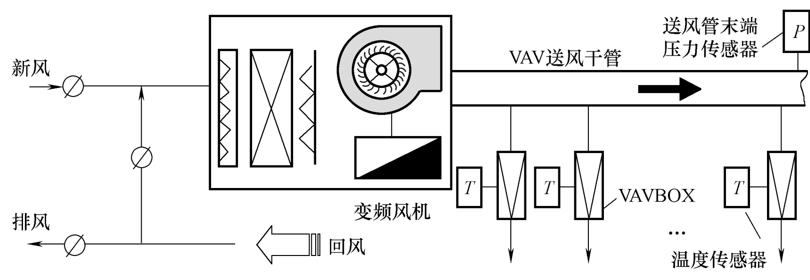


图 10-30　单风管 VAV 空调系统的结构原理

2. 单风管再加热 VAV 空调系统

在系统达到最小风量时，通过再热盘管的调节保证空调区温度不致过低或过热。系统工作过程中，如果送风量达到最小值，通过加热盘管的方式对送风温度进行调节，保证空调区的空气调节满足需求。单风管再加热 VAV 空调系统的控制系统如图 10-31 所示。

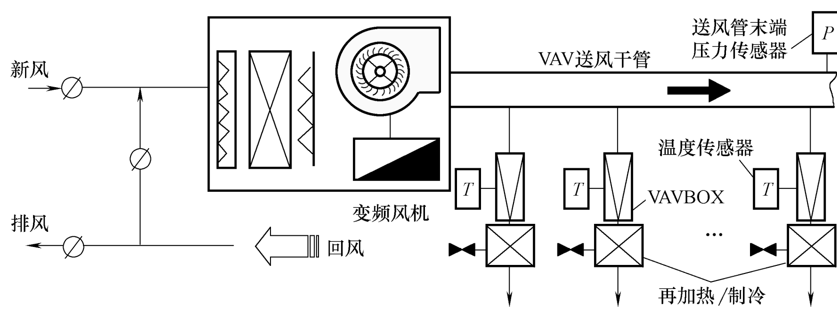


图 10-31　单风管再加热 VAV 空调系统

3. 单风管送回风联动的 VAV 空调系统

单风管送回风联动的 VAV 空调系统可通过空调区分支风管上的 VAVBOX 与回风管上的 VAVBOX 联动控制以调节送风量、回风量之差来实现控制空调区域静压目地。

4. 单风管旁通式 VAV 空调系统

单风管旁通式 VAV 空调系统工作过程：与室内负荷变化，进入室内的风量减少时，多余的风量通过旁道管口排出，与室内回风返回空调机组。这种工作方式，可满足恒温要求，系统结构较简单。

5. VAV 空调系统变风量末端装置与控制

VAV 空调系统在运行中，通过特殊的送风装置来调节风量，这类送风装置，即 VAVBOX。图 10-32 所示就是一个 VAV 空调系统变风量末端装置。

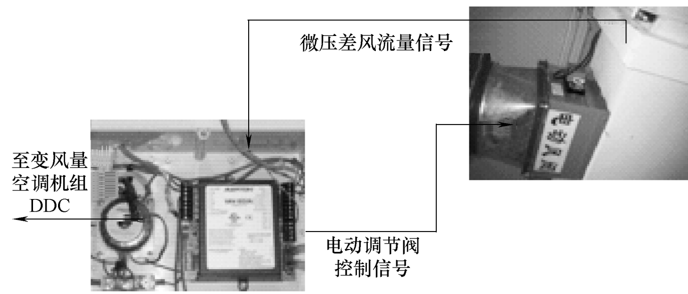


图 10-32　VAV 空调系统变风量末端装置

VAVBOX 一般有以下 3 种类型：

（1）普通型 VAVBOX

普通型 VAVBOX 主要由温度传感器、湿度传感器、电动风门，风速传感器、控制器等部件构成，通过调节风门来控制空调房间的温度。

温度传感器测出的温度信号送给 DDC 经过与设定值进行比较，取出偏差送给控制器经过算法处理后输出控制调节电动风门的开启度来调节空调区温度。

4 种普通型 VAVBOX 外观结构如图 10-33 所示。

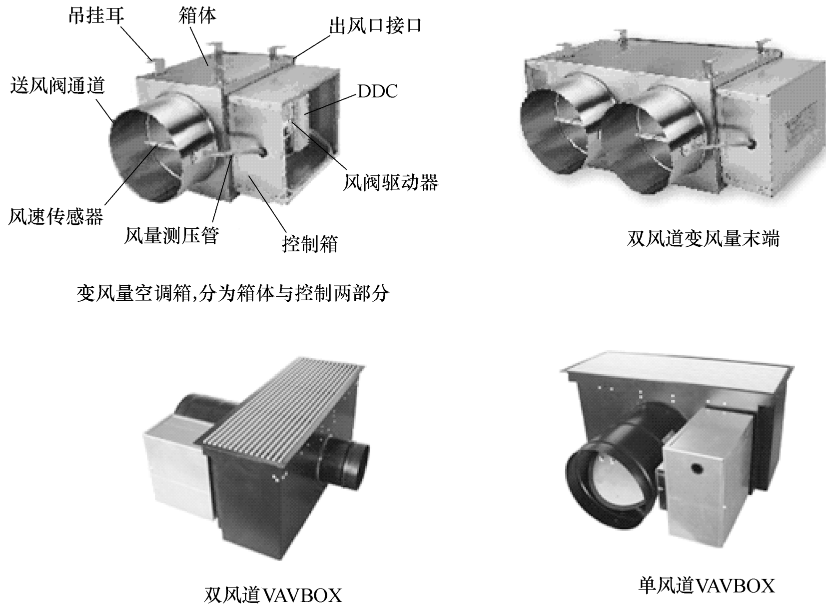


图 10-33　4 种普通型 VAVBOX 外观结构

（2）再热型 VAVBOX

在普通型 VAVBOX 的基础上增加了再热（冷）装置，就构成了再热型 VAVBOX。在风量统计的范围内，通过调节风门控制空调区温度，在风量调节到最大极限值，但温度仍达不到设定值时，通过 DDC 将加热器开启，控制风量调节空调房间温度来达到设定值。

（3）风机型 VAVBOX

在末端装置中增加了加压风机构成的系统叫风机型 VAVBOX。根据加压风机和变风量阀的排列方式可分为串联风机型和并联风机型。串联风机型指风机和变风量阀串联内置，一次风通过变风量阀，又通过风机加压；并联风机型是风机和变风量阀并联内置，一次只通过变风量阀，而不需要通过风机加压。这种末端装置工作时，室内温度分布和气流条件变好，但设备成本和运行成本提高，可靠性有所下降。

6. VAV 空调系统的分类

VAV 空调系统的种类很多，但可归纳为 3 种基本类型：

1）完全意义上的 VAV 空调系统，其末端装置与风机的调节是同步的。

2）旁通类型的 VAV 空调系统，其旁通风管末端是与定风量风机相连的。

3）变速电动机类 VAV 空调系统，通过改变风机运行曲线（如多极电动机、绕线转子电动机、变频调速电动机等）的方法来调节送风量。

第一、二种类型的 VAV 空调系统，多为小型 VAV 空调系统，其制冷量为 10RT～60RT。

10.7.6　VAV 空调系统特点

VAV 空调系统有以下主要特点：

1）节能效果好。变风量系统的末端装置可随着被调控区域的实际负荷需求来改变送风量。

2）可实现各局部区域的灵活控制。与 CAV 空调系统相比，VAV 空调系统能更有效地调节局部区域的温度，实现温度的独立控制，避免在局部区域产生过冷或过热，由此可减少制冷和供热负荷 15% ~30% 。

3）末端装置的送风散流器诱导率比较高，室内空气分布均匀，送风温度可降低，风管尺寸可减小，末端装置的数量可减少。

4）通过自动控制使空调和制冷设备按实际负荷需求运行，降低了电耗。

5）变风量系统实际上可以不作系统风量平衡调试，就可以得到满意的平衡效果，末端装置上的风量调节可以手动设定在一个确定的空气量上，系统风量平衡只要调节新风、回风和排风阀就可以了。

6）和定风量再热系统相比，VAV 空调系统对室内相对湿度的控制质量要差一些，但对于一般民用建筑，对湿度的控制完全能满足要求。

7）VAV 空调系统中增加了系统静压、室内最大风量和室内最小风量、室外新风量等控制环节，设备成本会提高。

10.7.7　一个典型的 VAV 空调机组控制

一个 VAV 空调机组控制系统原理结构如图 10-34 所示。

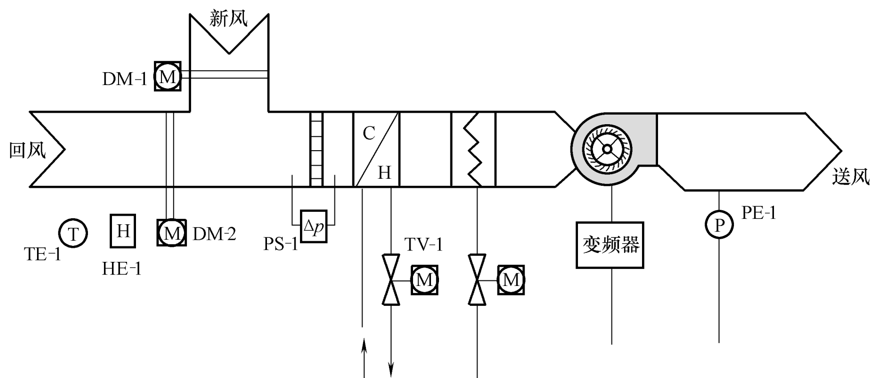


图 10-34　一个 VAV 空调机组控制系统原理图

TE-1—风管温度传感器　HE-1—风管湿度传感器　PE-1—压差变送器

TV-1—冷热水电动调节阀　PS-1—压差开关　DM-1、2—风阀执行器

系统中，DDC 可独立地通过相关传感器自动检测和控制回风的温湿度、过滤器阻塞报警、机组的起/停控制状态，并同时通过变频调速环节调节风机转速使送风压力恒定，所有控制逻辑均由软件编程来完成；DDC 通过通信接口与中央管理站联网，在监控室可集中监控楼宇设备并进行集中管理。

10.7.8　VAV 空调系统运行状态及参量监控

VAV 空调系统运行状态及参量监控的主要内容如下：

1）通过安装在室外的空气温度传感器和新风口上的风管式温度传感器检测室外和新风温度。

2）通过安装在室外/新风口上的风管式空气湿度传感器检测室外/新风的湿度。

3）在送/回风管中安装风管空气温度式传感器检测送回风温度。

4）在过滤网上安装压差开关检测过滤网两侧压差。

5）在送/回风管中安装风管空气湿度传感器监测送/回风湿度。

6）采用风管式压力传感器，监测送风管末端压强（空气）。

7）将空气质量传感器安装在回风管中，监测空气质量。

8）将风速传感器安装在送风管中，检测送风风速。

9）使用安装在回风管中的风速传感器，检测回风风速。

10）在冬季温度较低且低于 0℃的北方地区，通过安装在通风管表冷气出风侧的防冻开关输出，监测防冻开关的状态。

11）通过送/回风机配电柜接触辅助触点闭合情况监测送/回机运行状态。

12）通过送/回风机配电柜热继电器辅助触点的闭合情况，监测送/回风机的故障情况。

13）从 DDC 的 DO 口输出到送风机配电箱接触控制回路，对送/回风机进行起/停控制。

14）从 DDC 输出到送/回风电动机变频器控制口，对送/回风机的电动机转速进行调节。

15）自 DDC 的 DO 口输出到新风口风门驱动器控制输入点，进行新风口风门开度控制。

16）从 DDC 的 DO 口输出到回/排风机驱动器控制输入点，对回/排风机风门开度进行控制。

17）从 DDC 的 AO 口输入到冷热水二通调节阀门驱动器控制输入口，对冷热水阀门开度进行调节。

18）从 DDC 的 AO 口输出到加湿二通调节阀门驱动器控制输入口，对加湿阀门开度进行控制。

19）通过空调房间内的温度传感器，对 VAVBOX 房间温度进行检测。

20）通过安装在空调房间送风管中的风速传感器，对 VAVBOX 送风进行检测。

21）通过空调房间内的压力传感器，对 VAVBOX 房间静压进行检测。

22）通过 VAVBOX 控制器 AO 口到末端装置送风门驱动器控制输入口，对 VAVBOX 送风门开度进行调节。

23）通过 VAVBOX DDC 的 AO 口到 VAVBOX 回风风门驱动器控制输入口，对末端装置回风风门开度进行控制。

24）通过 VAVBOX 控制器的 DO 口到 VAVBOX 再热器控制输入口，对 VAVBOX 再热器进行开关控制。

25）通过对所有 VAVBOX 控制的风量检测值的计量及统计，实现对空调机组的送风量控制。

10.7.9　VAV 空调系统运行与节能控制

1. 联锁控制

VAV 空调系统的起动停机顺序控制要通过联锁控制来进行。

空调机组的起动顺序控制：新风风门开启→回风风门开启→送风机起动→排风风门开启→回风机起动→空调冷冻水/热水调节阀开启→加湿阀开启。

空调机组的停机顺序控制：加湿器停机→空调冷冻水/热水调节阀关闭→回风机停机→排风风门关闭→送风机停机→新风门/排风门关闭、回风门停机。

2. VAV 空调机组的送风量、送风温度调节与节能策略

VAV 空调系统控制的核心是对总风量进行控制。常用的总风量控制有：定静压定温度法、定静压变温度法、变静压变温度法和 VAV 总风量控制法。

（1）定静压定温度法（Constant Pressure and Temperature，CPT）

这种控制方法是：在送风温度保持不变，但保证系统风管中某一点或几个固定点处平均静压为一定值，通过控制变频器转速，将以上诸参考点的平均静压控制在给定值，实现总风量的调节控制。

多选送风干管末端的参考点平均静压作调节参量，控制机组风机转速来稳定末端静压。当为被调控区域的热负荷匹配增加供风量时，风管压降增加，末端静压降低，末端定压传感器测得的静压值送往 DDC 的 AI 口，与设定值比较后的偏差值，按特定调节规律运算并输出控制信号到变频器调节转速稳定静压。

这种末端静压和送风温度都不变的控制方法就是 CPT。

（2）定静压变温度法（Constant Pressure and Variable Temperature，CPVT）

当 VAV 空调系统末端负荷发生变化时，在保持参考点平均静压不变的条件下调节空调机组送风温度来实现末端负荷变化引起 VAV 空调系统总负荷的动态跟踪变化。

这种系统方法中，可以保持送风温度不变，通过调节空调机组通风量动态跟随末端负荷变化的要求，同时保证末端静压不变。也可以在保持空调机组通风量不变的情况下，通过调整空调机组送风温度来满足末端负荷变化的要求，同时保持末端静压维持在稳定值。还可以在保持末端定静压的条件下，同时调节空调机组的总送风量和送风温度，来实现定静压变温度的控制方法。

（3）变静压变温度法（Variable Pressure and Variable Temperature，VPVT）

在末端负荷变化时，同时调节末端静压和送风温度，即末端静压和送风温度均是可调节参数。

（4）总风量控制法

控制末端静压的 VAV 空调系统工作运行存在着不稳定性因素，采用总风量与末端负荷匹配的总风量控制法可有效地进行 VAV 空调系统中的运行与节能运行控制。通过自动计量和统计求出各末端风量总量，通过送风机相似特性及相关的计算求出对应的送风机转速，并控制空调机组送风机在此转速运行，使送风量与负荷匹配，这就是 VAV 空调系统中的总风量控制法。

在控制精确度要求不高时，构建开环的总风量控制系统，此时控制策略与算法较简单，稳定性好，但是在各末端风量处在动态变化及设备性能变化时，VAV 空调系统工作运行误差就很大，采用反馈方式构成闭环控制后，系统性能会大幅提升。

3. 回风机转速控制

在较大的 VAV 空调系统中，末端数量多、分布范围大，总风量大且风道管路较长，系统装置中包含总回风管路中的回风机。在控制上，除了对风机进行变频调速控制外，还要求对回风机进行相应的联动控制，即对送风量控制，同时也对回风量控制，以保证空调房间在其他运行参数得到满足的同时满足送风量和回风量的平衡。一般情况下，回风量要小于送风量，但在被调控区域有负压要求时，回风量要大于送风量。要根据系统的实际情况确定送风量与回风量的差值，同时根据风管末端静压信号，调控回风机的转速及风量。

还可以将送风机前后风道压差测量值和回风机前后风道压差测量值送入 DDC 的 AI 口并与 DDC 内存储的设定值进行比较，对偏差进行给定控制算法运算后，输出控制信号调节风机转速使回风量满足要求。

4. 湿度控制

被调节区域的湿度平均值可用空调机组回风相对湿度来描述，因此以空调机组回风的相对湿度作为调节量，调节送风含湿量来实现湿度控制。回风管中的空气湿度经湿度传感器检测得到并送往 DDC，与设定值比较，其偏差经 PI 运算得到控制信号调节加湿阀开度，将空调机组回风的相对湿度控制在设定值。

5. 空气质量控制

对空调机组的回风总管中的 CO_2、CO 含量进行检测，以此来确定空调区域的空气质量。空调质量传感器检测到的 CO_2、CO 浓度值信号送往 DDC，DDC 处理后输出控制信号控制新风风门开度，调节空间区域的空气质量。

6. 新风量、回风量与排风量的比例控制

焓值描述湿度空气的温度和含湿量，DDC 根据新风的温湿度、回风的温湿度进行回风及新风的焓值计算，并按回风和新风的合理焓值比例调节新风/回风风门的开度，使系统在接近最佳的新风、回风量比值状态运行实现节能。

7. 过滤器压差检测

在过滤器上安装压差开关检测过滤器两侧压差，在过滤网发生积灰积尘，堵塞严重时压差开关报警，维护人员干预，进行清理和清洗。

8. 空调机组防冻保护

在换热器出风侧使用防霜冻开关检测温度，当温度低于 5℃时，表明室外温度过低，防霜冻开关给出报警信号，关闭风机，防止换热器温度进一步降低。

9. 空调机组的定时运行及 VAV 空调系统设备的远程控制

对 VAV 空调系统的控制内容包含：按给定的时间表进行起停控制；中央监控系统对 VAV 空调系统设备具有远程开/关操作功能。

10.7.10　变风量空调系统的设计

设计良好的 VAV 空调系统是目前最为节能的中央空调系统的一种，与传统的中央空调系统相比，其能耗减少幅度可达 50%。由于系统只在冷或热负荷到达峰值时才使用最大风量，而不采用变风量方式工作的中央空调系统的能耗大大高于 VAV 空调系统，由于各工作区的峰值负载不是同时出现的，在大型的办公建筑中，系统负载量是其峰值时（或全部 VAVBOX 负载总容量）的 70%。

若设计合理的话，VAV 空调系统具有良好的灵活性，系统可很方便地扩展、重组或部分卸载，而不致显著影响中央空调系统的工作。

1. VAV 空调系统设计注意点

1）要获得高风速低流量，推荐使用高拖带力送风末端，相反低拖带力系统（如吊顶通风装置）应用于此就会有问题。

2）在最小和最高风量情况下，出风口动作应同样自如。

3）对室内空气扰动小。

4）由于附壁效应的存在，供风会在墙顶附近聚集而降低送风效率，故墙面应保持平整，除非所有的墙面凹凸都远离送风口。

5）荧光灯的凹形反光槽会显著影响设计风速，两者需隔开一定距离。

6）VAV 气流分布系统的是极其重要的，其远比 CAV 系统来得复杂，其中有许多因素需要考虑、验证、再验证。

以下讨论的是一些对最小风量影响非常关键的因素：

1）通风的需要；

2）湿度；

3）供风口的适当流量；

4）VAV BOX 工作情况；

5）噪声等级；

6）管道总压力的增加；

7）风机上压力的变化；

8）风机运行及稳定状况。

基本系统设计概要如下：

1）在制定大楼外观及结构的设计标准之前，先决定中央空调系统在运行状态下需要及所用到的设备。

2）划分需要进行温度控制的区域。

3）计算整幢大厦的冷、热负荷及各个区域的极值情况。

4）估算出同步峰值负荷情况，并在可行的条件下，得出分配系统。

5）计算不同区域及独立空间所需的风量。

6）选择最为匹配的 VAV 和 CAV 空调系统及所使用的中央设备。

7）划分不同系统的区域。

8）决定风管系统走向与尺寸。

9）选择出风口及末端设备的位置与尺寸。

10）对每一系统计算在最大与最小风量下的管道阻力。

11）计算差异因素（如需要）。

12）挑选风机，检测其在最大（小）风量的运行情况。

13）挑选中央制冷（暖）站设备。

14）规划水管系统。

15）选择主要的中央制冷/热设备的规格（锅炉、水泵、冷冻机等）。

16）计算系统热损失与增益。

17）选择辅助设备。

18）设计控制系统与设备。

在 VAV 空调系统中，对负荷的正确估计是很重要的。若不能准确计算室内净负荷，VAV 空调系统风量提供过剩，造成在满负荷时仍需一定节流控制或在局部负荷时已超过节流范围。此外，选择风机、管道、末端及控制阀门也应避免尺寸过大。

2. 内、外区组合系统和 VAV 再加热系统

（1）内、外区组合系统

一种方式是在一个系统内组合了内区和外区。外区的控制系统是内区扩展而成。内区是单制冷 VAV 空调系统，外区是单制冷 VAV 空调系统再加上末端再热系统，组成了周边区域控制系统。

（2）VAV 再加热系统

如 VAV 空调系统周边区域使用再加热系统，当风量减少至预设置的最小值时，再加热系统才开始工作。

系统的最大送风量取决于系统的最大瞬时负载而非各区峰值的总和。同时由于系统其他各种附属系统的存在，如某些场合存在着间歇性的负载（如会议室、办公设备室等），都是使总风量减少的因素。由于风量削减是控制的第一步，只有在系统到达最小风量时，加热系统才会工作。这种控制过程可在夏季和过渡季明显降低能耗。

在系统末端装有专为 VAV 再加热系统使用的两个调节器：一种类型是温控器；另一种是最小风量控制器。由于有最小新风量的存在，故在过渡季会出现加热和制冷同时存在的情况。

3. 设计良好的典型 VAV 空调系统应具备的特征

1）与周边加热系统结合在一起，VAV 空调系统是多区空调的一种代价较高的控制方式。其制冷和加热系统同步性和灵活性都比较高。

2）典型的 VAV 空调系统最大的优点是可从灯光、人员、阳光和设备的转换中获取能量，可达到峰值负载总和的 30%。这样，可大大节省风机、冷冻机、加热器、辅助设备及管道安排的开销。从这些地方节省下的费用比增加 VAVBOX、风机控制器等所需的开销多得多。

3）典型的 VAV 空调系统实际上是个自我平衡系统，只有在静压控制和风量调整不充分时，该特点才不明显。网络越复杂，静压和风量控制的要求就越高。当满负荷送风量远远大于实际负载的需要时也难以实现自平衡的特点。在 VAV 空调系统和再加热系统中附加制冷和加热所造成的风机耗能也值得注意。

4）VAV 空调系统可以较少的代价自由重新划分区域或增加新的负荷，只要这个整个系统可承受所增加的负荷且该负荷不超过最初设计的峰值。但这个特点不适用于旁路系统，除非在此范围内的系统硬件分布可保证其进一步细分及部分改变。VAVBOX 应考虑到风口尺寸，使用风管末端连接口（从大楼周边的通风口引出或从某些独立风机系统引出），方便不同接口的需要，同时也消除了管道末端的功能限制。

5）从以下途径节约费用（不适用于旁路系统）：

① 根据风机驱动形式和能耗下降合理选取风机电动机功率，使风机长期运行于低风量状态下，减少风机的功耗。

② 在 VAV 空调系统调节过程中，加热器和水泵能耗下降。

③ 从“自然冷却”方式中获益。

a. 在最小新风量时，送风流量小，混风温度较低。

b. 由于某些低负荷区域维持在最小风量，送风管道内的低流量送风因环境温度而上升，这样可减少再加热使用的能量。由于通过的风量较少，过滤器的寿命将显著延长。

④ 对不使用的区域，可停止该区域的制冷与通风。

6）减少低于设计空气流量的运转时间已成为发展趋势，尽管会给设计方案带来难度。室内的风速要求小于 3～4.5m/min，而 VAVBOX 在调节时产生的风速变化会使人感到不舒服，这在大风量送风口尤为明显。解决的方法是加大吊顶风口的尺寸，一般将送风口的额定流量加大到 1500m^3/h 以上。

7）如果对风机与 VAV 空调装置的静压控制器经过仔细的选择，那么只有在满负荷情况下，VAV 空调系统才有较大的噪声，在非峰值时噪声还是很小的。

8）同时制冷、加热，无季节转换。

9）中央空调设备不需分区控制。

10）内外联合式 VAV，附以再加热末端的系统的初投资小于内外区分立、周边辐射的系统。在能耗及使用费用上前者大于后者。

4. 节能考虑

与其他空调系统相比，真正的 VAV 空调系统具有在最低能耗下灵活实现加热/制冷的潜力。要实现这个潜力，必须注意以下设计特点：

1）不使用任何增加功耗的加热类型，如大多数双风管定风量和所有的再加热系统。当 10～15℃的混合风经过空调的附加能源再加热至 24℃及更高的温度时（除了使用最小新风热能），单风机双风管系统是非常耗能的，同样在混合区制冷效应也被抵消。

2）真正的 VAV 空调系统的风量应该是随着各区风量减少而同步减少的。它间接减低系统制冷功耗，同时节省了风机年均耗能。

3）对包括诸多内区空调的 VAV 设计，只需根据同时负荷率（瞬间的最大负荷）而不是按各个区域峰值负荷的总和来选择风机容量。这可大大节省风机运行功耗。

4）有时可以采用两种类型的 VAV 空调系统来最大效率地降低能耗。一个是利用独立的外区

与内区风机实现全空气加热制冷系统，另一个是常见的辅助加热系统对内、外区提供相同风温。

① 带独立风机的周边空调系统可采用自循环控制方式（无新风），在加热季节可充分回收利用室内的灯光热量，当内部使用热泵作为热回收源，所有的内区热量都可提供给周边系统。

② 变风量单冷或混合（冷热）系统都只是在局部冷负荷时减少系统风量，而不是在满负荷的情况下。

如用普通温度向内、外区送风，周边辐射系统。可使用接触面积大、温度较低的对流器，通过热泵回收内部热能用于周边区域。对于这种热泵的设计，应与无需冷冻机产热系统且不会因无经济循环造成冷冻机产热的浪费新风经济制冷循环比较其经济性。而这种经济性的比较还应考虑到每年因风门泄漏而额外耗能的费用。

10.8 通风系统自动控制

对于现代建筑中的一些对温湿度无较高要求，但对空气质量有较高要求的场所，如地下车库、一些仓储区域、厨房和锅炉机房等。对于这些区域可设置通风、排风设备进行通、排风，保证空气质量。

对于通、排风控制精确度要求不太高的场合，可通过安排依据较简单的控制策略或时间表对通/排风设备进行程序的起/停控制。对于空气质量要求较高的调控区域，通过 CO_2、CO 传感器检测现场空气中这些气体的含量，通过特定的控制策略，及时起动风机及控制投入运行的风机台数与运行时间来保证空气质量。

如果排风机具有在有火情时作为排烟机或补风机的功能，就需要在电器联动控制或监控程序方面进行整体规划与设计。

部分新风机的外观如图 10-35 所示。

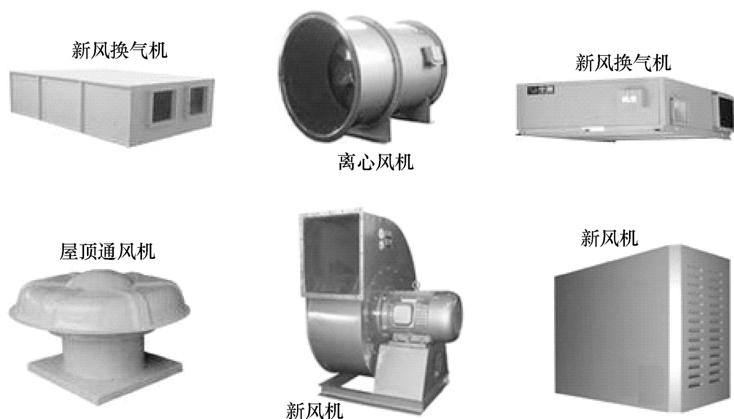


图 10-35　部分新风机的外观

10.9 空调房间热负荷和湿负荷计算及新风量确定

10.9.1 空调房间热负荷及计算

1. 空调房间热负荷

为保持所要求的室内温度，必须由空调系统从房间带走的热量叫空调房间冷负荷。如果空调

系统需要向室内提供热量，以补偿热损失，这时房间负荷为供热负荷，简称热负荷。

可以使用冷负荷系数法来计算空调冷负荷。下面介绍基于冷负荷系数法的一种实用方法。

2. 影响空调系统热负荷的重要因素及温湿度和相关性

空调系统中的各个设备容量是按照容量冗余原则选择的，即根据空调房间内可能出现的最大热、湿负荷进行选择的，而在空调的实际运行中，空调负荷是动态变化的。

当空调系统在运行过程中的某一时刻处于稳定状态，空调房间内的空气温度保持恒定，流出和流入空调房间内的热量处于平衡状态。

由于外部的干扰作用破坏了原来的能量平衡状态，引起调节参数的变化，于是调节过程便开始，以改变对象的输入或输出的能量，使能量达到新的平衡，使调节参数回到给定值。

（1）影响空调系统负荷的部分重要因素

空调系统负荷在多种外部因素的作用下呈动态变化，这些外部因素主要有以下一些情况：

1）太阳辐射：通过空调房间的外窗进入室内的太阳辐射热，将会受到天气阴、晴变化影响。

2）室外空气温度：由于室内、外温差的变化而引起室内、外热量传递的变化，从而造成空调房间内热负荷的变化。

3）室外空气的渗透：室外空气通过空调房间的门、窗缝隙进入室内，造成对室内温度的影响。

4）新风：为了满足室内卫生需要和正压及排风等要求，而采入室外空气量的变化，即新风的使用情况直接造成室内热负荷的变化。

5）建筑环境内照明、电热及机电设备的开启、停止和投入使用数量的变化。

6）建筑环境内部工作人员数量的增减会直接影响到热负荷的水平。

7）室内湿度变化引起热负荷的变化，室内湿度变化也会导致空调系统热负荷的变化。

8）建筑外围护对空调区域的热负荷水平也关系重大。

（2）温、湿度的相关性

空调房间内温度和湿度是两个紧密关联的物理量及参数，这两个参数常常是在一个调节对象里同时进行调节的两个被调量。两个参数在调节过程中既相互制约又相互影响。如果由于某些原因使空调房间内温度升高，引起空气中水蒸气的饱和分压力发生变化，在含湿量 d 不变的情况下，就引起了室内相对湿度的变化（温度的升高会使相对湿度降低，温度的降低则会使相对湿度升高）。在调节过程中，对某一参数进行调节时，同时也引起另一参数的变化。

3. 室内外热源形成的冷负荷

室外热源形成的负荷由“通过围护结构传热形成的冷负荷”、“透过玻璃窗进入室内的太阳光辐射形成的冷负荷”和“室内热源形成的冷负荷”三部分组成。

（1）通过围护结构（外墙和屋顶）传热形成的冷负荷

$$Q = KF(t_u - t_n)$$

式中　Q——在太阳辐射热和室外空气综合作用下通过外墙或屋顶形成的室内冷负荷（W）；

K——围护结构（外墙和屋顶）的传热系数 [W/(m^2·K)]；

F——围护结构的传热面积（m^2）；

t_u——冷负荷计算温度（℃）；

t_n——室内空气温度（℃）。

（2）透过玻璃窗进入室内的太阳辐射形成的冷负荷

在室内、外热源的作用下，某一时刻进入空调房间的总热量叫该时刻的得热量。

1）对没有内遮阳的玻璃窗：最大冷负荷 =（0.6～0.7）× 最大得热量。

2）对有内遮阳的玻璃窗：最大冷负荷 =（0.8 ~ 0.85）× 最大得热量。

3）对设有内遮阳的玻璃窗：最大冷负荷出现时间比最大得热量出现时间推迟约 1h。

（3）室内热源形成的冷负荷

1）人体散热和散湿。人体的散热量和散湿量与性别、年龄、衣着、劳动强度及环境温湿度有关。

人体散热量计算：

$$Q = qnn'$$

式中　q——不同室温和劳动性质时成年男子散热量（W）；

n——室内人数；

n'——群集系数，随人员组成而定。

人体的散湿量计算：

$$w = un$$

式中　u——不同室温和劳动性质时成年男子的散湿量（g/h）。

2）照明灯具散热：照明灯具散热量计算如下：

$$Q = n_1 n_2 N$$

式中　N——照明灯具的安装功率（kW）；

n_1——镇流器消耗功率系数，对白炽灯 $n_1 = 1.0$，镇流器装在顶棚内的荧光灯 $n_1 = 1.0$，镇流器安装在空调房间内的荧光灯 $n_1 = 1.2$；

n_2——灯罩隔热系数。

3）电热设备的散热：电热设备的散热量计算如下：

$$Q = n_1 n_2 n_3 n_4 N$$

式中　N——电热设备的安装功率（kW）；

n_1——利用系数，设计最大实耗功率与安装功率之比，一般可取 0.7 ~ 0.9；

n_2——同时使用系数，即同时使用的安装功率与总安装功率之比，一般可取 0.5 ~ 1.0；

n_3——负荷系数，每小时平均实耗功率与最大实耗功率之比，一般可取 0.5 左右；

n_4——通风保温系数，一般可取 0.5。

夏季部分不同的空调房间冷负荷概算指标，见表 10-1。

表 10-1　夏季部分不同的空调房间冷负荷概算指标

场所	空调房间冷负荷概算指标/(W/m^2)
办公楼(全部)	95 ~ 115
超高办公楼	105 ~ 145
旅馆(全部)	70 ~ 95
剧场(观众厅)	230 ~ 350

10.9.2　湿负荷及计算

1. 湿负荷

为使室内维持一定的湿度，空调系统在制冷和制热的同时，还要排除或增加一定的湿量，这个湿量称为湿负荷。

2. 湿负荷计算

室内湿源的散湿量即形成空调房间的湿负荷。部分典型湿源形成的湿负荷计算如下：

（1）敞开水槽的散湿量

$$W=\beta(p_{q.b}-p_q)F\frac{B}{B'}$$

式中　$p_{q.b}$——相应于水表面温度下的饱和空气的水蒸气分压力（Pa）；

p_q——空气中水蒸气分压力（Pa）；

F——蒸发水槽表面积（m^2）；

β——蒸发系数［kg/(N·s)］，$\beta=(a+0.0036v)\ 10^{-5}$；

B——标准大气压力（Pa），其值为 101325Pa；

B'——当地实际大气压力（Pa）；

v——水面上周围空气流速（m/s）；

a——不同水温下的扩散系数（kg/N·s）。

（2）地面积水蒸发湿量的计算方法

视具体情况而定。

10.9.3　空调房间送风量的确定和空调系统新风量的确定

1. 空调房间送风量的确定

夏季空调房间的送风量 G(kg/s) 可使用下式计算：

$$G=\frac{Q}{h_N-h_O}=\frac{1000W}{d_N-d_O}$$

式中　Q——空调房间的总余热量；

W——空调房间的总余湿量；

d_N——室内空气的相对湿度；

h_N——室内空气的焓值；

d_O——送风的相对湿度；

h_O——送风的焓值。

如果已知送风温度 t_0，送风温差 Δt_0、设计温度和湿度，就可以从焓湿图上读出送风状态 O（h_O，d_O）和室内状态 $N(h_N, d_N)$，并求出夏季空调房间的送风量 G。

2. 空调系统新风量的确定

空调系统的主要前端设备空调机组使用回风，与新风机组相比会产生很好的节能效果。合理的确定和选用回风量，是空调节能的有效途径之一。送风中包括新风的引入，来满足室内用户人体生理需氧量并稀释室内二氧化碳和甲醛等有害气体和气味。引入一定量的新风还能维持空调房间内一定的正压需求，如果空调房间内有局部排风系统时，引入新风还可以对排风量进行补偿。

国家对一般场所室内空气的新风量标准是 $30m^3/h$。对一些特殊场合，如医院、商场、学校等要求的新风量更高。

国标暖通空调设计规范，对各类民用建筑的最小新风量给出了推荐值。表 10-2 给出的最小新风量可供民用建筑参考。

表 10-2　民用建筑最小新风量

建筑物名称	每人最小新风量/(m^3/h)（不吸烟情况）	建筑物名称	每人最小新风量/(m^3/h)（不吸烟情况）
宾馆、饭店(客房)	30	餐厅	20
体育馆	8	个人办公室	25
办公室	18		

10.10 BAS 设计的基础知识

BAS 实现整幢建筑中的建筑机电设备自动化管理与监控，不仅仅能够为用户提供高效能的工作环境和条件，还能够建立先进与科学的综合管理机制。

除此之外，通过有效节能举措实现建筑的节能降耗。我国某城市的一家博物馆装备了 BAS，该馆自 20 世纪的 90 年代投入使用以来，每年的水、电、煤气的综合耗能远远低于原设计指标。该 BAS 可以将每一个展厅的湿度控制精确度保持在 ±2%，温度变化控制精确度为 ±1℃，楼宇内的所有空调机每天实际工作时间仅为 1～1.5h。和不装备 BAS 的情况相比，每台空调设备每天平均实际工作时间减少 6h 左右，营运人员数量减少约 60%；楼宇营运总体费用降低为不使用 BAS 情况的 50% 左右。

在进行综合管理和突发事件的处理上，能够全面科学合理地协调调度各个子系统。如大厦某个区位发生火情，火灾探测传感器检测到火情后，立即将火情的准确位置、温度、烟量信息送往中控室，中控室的中央管理工作站根据数据库的存储数据资料调出发生火情区位的人员情况、水箱存水量及通风情况。同时，迅速发出火情警报，通知人员疏散，保安人员准备灭火；启用联动装置关闭发生火情区域的通风设施，开启消防通道，关闭其他楼层的供水等综合联动举措。

10.10.1 BAS 设计的范围和系统规模确定

1. 设计范围

1）楼宇自控是围绕楼宇内各类机电设备的运行、安全、节能等要求对各类设备进行实时自动监测、控制和管理的系统。

2）系统对温度、湿度、流量、液位、电能、照度、有害气体浓度等物理量实现实时监控。

2. 系统规模确定

BAS 规模是根据系统实现监测控制点数来划分的。

1）根据工程的具体内容，分析控制项目组成及要求，测算归纳控制点数量，确定系统规模。

2）BAS 可分为Ⅰ类：大型、较大型；Ⅱ类：中型、较小型。

系统规模划分见表 10-3。

3）监控点的规划要保有一定的冗余余量。Ⅰ类系统应留余量 10%～15%；Ⅱ类系统应留余量 15%～20%。

表 10-3 BAS 规模分类

分类	规模	控制点	系统一次投资/(万元/点)	建筑总投资(自控占 2%)	建筑规模(m^2)
Ⅰ	大型	<5000	<800	<4 亿元	<9 万
	较大型	<2500	<400	<2 亿元	<5.7 万
Ⅱ	中型	<650	<110	<5200 万元	<1.6 万
	较小型	<160	<26	<1300 万元	<0.4 万

10.10.2 通信网络设计

通信网络设计要求：

1. BAS 的通信网络设计

BAS 的通信网络包括两个部分，即管理网络和控制网络，所以通信网络设计一般包括管理网

络设计和控制网络设计。

2. 通信网络设计使用的传输介质

通信网络传输介质宜选用双绞线、同轴电缆、光缆以及不同控制网络所要求的特定通信线缆；在满足传输速率要求时，优先选用双绞线（或屏蔽双绞线）；穿越户外时宜选用同轴电缆；在强电磁干扰环境中和信号传送距离较远时，多选用光缆。

3. 预留与第三方子系统通信的接口

通信网络要预留接收第三方子系统如消防报警和安全防范系统信号的接口。

10.10.3　控制点规划

系统传感器采集和控制器及中央管理工作站处理信号可分为模拟信号和数字信号两大类。

1. 模拟信号

连续变化的物理量信号就叫模拟信号，如温度、湿度、流量、气体浓度、电流、电压、频率等。在控制系统中，模拟信号一般经转换器转为 4 ~20mA 或 1 ~5V 的标准电流或电压信号传输。

2. 数字信号

脉冲信号、阶跃或开关量信号是数字信号，如接通/关断、起动/停止、上/下限报警、累计计数等。

编制 BAS 的点表时，按模拟输入（AI）、数字输入（DI）、模拟输出（AO）、数字输出（DO）进行分别统计。

10.10.4　中央管理机设计

中央管理机也叫做中央管理工作站或中央监控主机，设计要点如下：

1. 中央管理工作站硬件配置

Ⅰ类 BAS 应该配置处理能力强的工业级计算机。当 BAS 规模较小时，采用配置较高的 PC 就可以。

2. 中央管理工作站软件配置

中央管理工作站应具备系统软件、应用软件、语言处理软件、数据库生成和管理软件、通信管理软件、故障自诊断软件及系统调试与维护软件。

3. 中央管理工作站电源设计

由变电室专路为中央管理工作站供电，负荷等级不低于所处楼宇中最高负荷等级。

中央管理工作站应配置 UPS（不间断供电电源），容量是中央管理工作站的全部负荷与为系统扩充预留负荷之和，供电时间不小于 30min。

10.10.5　现场分站设计

现场分站指安装有 DDC 的控制单元，多表现为控制箱形式。

1. 现场分站功能

DDC 具有独立的控制程序，控制程序包含各种有效的算法。现场分站能够独立地实现对所负责监控设备和监控参量实施有效和可靠地监控，监控内容包括：实时采集各种现场被控物理量的数据信息，实时调节、驱动执行机构。DDC 直接和中央管理工作站进行通信。中央管理工作站对现场分站的运行进行检测、高权限的管理、参数设定、监控程序运行的一定程度管理。中央管理工作站出现故障时，即使和分站断开通信联系，分站也一样有序地按照设定程序控制相关建筑机电设备工作运行。

2. 分站容量及位置

1）分站容量根据所负责监控设备的数量及监控点数确定，但应该留有 10% ~15% 的余量。

2）分站位置选在受控设备相对集中处，并以达到末端元件距离较短为原则（一般不超过 50m）。

3）分站多选壁挂箱式结构。如果在设备集中的机房控制模块较多时，也可选落地柜式结构。

3. 分站电源配置

1）Ⅰ类系统，当中控制室设有 UPS 时，分站电源由 UPS 电源盘集中供给，线路采用放射式或树干式。

2）Ⅱ类系统，分站电源可就地由邻近动力盘专路供给。

4. 分站控制接线尽量避开的一些情况

1）分站设置地点要远离有压输水管道；以免管道、阀门跑水，殃及控制盘。在潮湿、蒸汽场所，应采取防潮、防结露措施。

2）分站设置地点要远离电动机、大电流母线和强电电缆通道，间距至少为 1.5m，以避免电磁干扰。在无法躲避干扰源时，应采取可靠的屏蔽和接地措施。

10.10.6　空调冷热水系统的一些参数设置

国标对空调冷热水系统给出了参数设置范围：

1. 空气调节冷热水参数设置

应通过技术经济比较后确定，宜采用以下数值：

1）空调冷冻水供水温度：5 ~9℃，一般为 7℃；

2）空调冷冻水供回水温差：5 ~10℃，一般为 5℃；

3）空调热水供水温度：40 ~65℃，一般为 60℃；

4）空调热水供回水温差：4.2 ~15℃，一般为 10℃。

2. 空调水系统的闭式循环及开式系统运行方式

空调水系统宜采用闭式循环。当必须采用开式系统时，应设置蓄水箱。蓄水箱的蓄水量，宜按系统循环水量的 5% ~10% 确定。

3. 两管制和四管制水系统

全年运行的空气调节系统，仅要求按季节进行供冷和供热转换时，应采用两管制水系统；当建筑物内一些区域需全年供冷时，宜采用冷热源同时使用的分区两管制水系统。当供冷和供热工况交替频繁或同时使用时，可采用四管制水系统。

4. 冷冻水输运中的一次泵和二次泵

中小型工程宜采用一次泵系统；系统较大、阻力较高，且各环路负荷特性或阻力相差悬殊时，宜在空气调节水的冷源侧和负荷侧分别设一次泵和二次泵。

5. 多台冷冻站构成的空气调节水系统要配置自控系统

设置 2 台或 2 台以上冷水机组和循环泵的空气调节水系统，应能适应负荷变化改变系统流量，设置相应的自控系统。

6. 水系统的竖向分区及风机盘管水系统分区

水系统的竖向分区应根据设备、管道及附件的承压能力确定。两管制风机盘管水系统的管路宜按建筑物的朝向及内外区分区布置。

7. 空气调节水循环泵的选用

选用原则：

1）两管制空气调节水系统，宜分别设置冷水和热水循环泵。当冷水循环泵兼作冬季的热水循环泵使用时，冬、夏季水泵运行的台数及单台水泵的流量、扬程应与系统工况相吻合。

2）一次泵系统的冷水泵以及二次泵系统中一次冷水泵的台数和流量，应与冷水机组的台数及蒸发器的额定流量相对应。

3）二次泵系统的二次冷水泵台数应按系统的分区和每个分区的流量调节方式确定，每个分区不宜少于2台。

8. 空调水系统布置和选择管径

应减少并联环路之间的压力损失的相对差额，当超过15%时，应设置调节装置。

9. 空调补水泵选择

空调水系统的补水点，宜设置在循环水泵的吸入口处。当补水压力低于补水点压力时，应设置补水泵。空气调节补水泵按下列要求选择和设定：

1）小时流量宜为系统水容量的5%～10%；

2）严寒及寒冷地区空气调节热水用及冷热水合用的补水泵，宜设置备用泵。

10. 补水泵与补水调节水箱

当设置补水泵时，空气调节水系统应设补水调节水箱；水箱的调节容积应按照水源的供水能力、水处理设备的间断运行时间及补水泵稳定运行等因素确定。

11. 硬水处理

当给水硬度较高时，空气调节热水系统的补水宜进行水处理，并应符合设备对水质的要求。

10.10.7　中控室

楼宇内和BAS一般要设置一个监控中心，监控中心将BAS，消防系统、安防系统集中在一个控制室内实施管理，这样可以做到全面监控和对各个子系统进行协调及管理，及时快捷地响应处理各类突发事件，提高防灾及处置能力，节省管理人员，作为一个综合性的监控中心，通常被称为中控室。

我国在“智能建筑设计标准”中明确提出：消防控制室可单独设置，当BAS和安防系统合用控制室时，相关设备应辟出独立的区域，并确保各子系统的设备工作不会互相干扰。监控中心用途、位置和设备布置情况如下：作为楼宇自控中心，监控中心设有中央工作站，由计算机系统和显示输出设备组成，中央站也叫管理中心或上位计算机，可对整个系统实行管理和优化调节，其作用是：可对BAS的全部重要数据都能方便地读取和存储、监测、控制和打印输出，非标准程序的开发等。

监控中心位置宜设置在主楼底层接近被控设备中心的地方，也可在地下一层。监控中心要求设置在无有害气体、远离变电所、电梯、蒸汽及烟尘、水泵房等易产生强电磁干扰的地方。监控中心应将楼宇的重要区域的消防、安防、疏散通道及相关设备的所在位置给出醒目的平面图或模拟图。

较大型的监控中心一般有照明控制盘，变配电控制盘、通信控制盘、闭路电视控制盘、消防控制盘、保安控制盘、公共广播、内部电话及闭路电视监视器，还有一些相关的显示控制台、打印机等。

一个监控中心所占面积与楼宇建筑面积间有一个可参考的比例关系：如楼宇建筑面积为10000m^2时，监控中心面积为20m^2；楼宇建筑面积为30000m^2时，监控中心面积为90m^2。

监控中心的一些技术条件有：

1. 空调

可用中央空调或自备专用空调。

2. 照明

平均最低照度为 150 ~ 200lx，一般采用无栅暗装照明，最好是反光照明。

3. 消防

用卤代烷替换品或二氧化碳固定式或找手提式灭火装置，禁止用水灭火装置，必须装备火灾报警设施。

4. 地面和墙壁

宜采用架空防静电活动地板，高度不低于 0.2m，一般高度为 0.3m，以便敷设线路。也可不用架空活动地板，如用网络地板扁平电缆。地面和墙壁应有一定的耐火极限。

5. 不间断电源（UPS）设置

可以使用集中的大容量 UPS，也可采用分散小型的 UPS。UPS 耗资较多，需选择适宜的容量。使用以下两种方法选用 UPS：

（1）根据正常容量计算

所有负荷容量的算术和再加上预计的扩展容量（不含 BAS 中的执行机构）。

（2）由起动容量计算

单台容量为最大设备额定容量的 10 倍加上其他设备的额定容量之和。选择最接近以上计算值且容量稍大的 UPS。UPS 供电时间不低于 20min。

10.11　PID 控制

PID 调节器是工控系统和楼控系统中应用广泛的控制器。PID 是 Proportional（比例）、Integral（积分）、Differential（微分）三者的缩写。PID 调节是连续控制系统中技术最成熟、应用最为广泛的一种调节方式。PID 调节器结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便。当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型，控制理论的其他技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时，最适合用 PID 控制技术。PID 控制，实际中也有 PI 和 PD 控制。PID 调节器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。PID 调节器算法简单实用，不要求受控对象的精确数学模型。

楼控系统中广为使用的冷冻水流量控制、各种风门的开度控制及多种控制环节都要使用 PID 调节器技术，PID 调节器是适用于线性系统的控制器。

10.11.1　比例调节、积分调节和微分调节

1. 比例调节

比例调节中，调节器输出 u 与偏差信号 e 成比例：

$$u = K_e e$$

式中　K_e——比例增益。

2. 积分调节

在积分控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对一个自动控制系统，如果在进入稳态后存在稳态误差，则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出

增大使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例 + 积分（PI）控制器可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

3. 微分调节

在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳，其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后（delay）组件，具有抑制误差的作用，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。这就是说，在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势，这样具有比例 + 微分的控制器就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例 + 微分（PD）控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

4. “比例—积分—微分”（PID）控制器

在 BAS 中，PID 控制器是一种常用的控制器。以室温控制为例。如果房间较大而供暖量不太大，则过程将倾向于对控制器的控制进行缓慢响应；如果由于出现开窗或在冷天时调高设置点而使过程变量突然偏离设置点，则 PID 控制器的即刻反应主要由微分作用项而产生，而这又将使控制器对突然偏离零的误差变化启动一次紧急校正，同时设置点与过程变量之间的误差亦将启动自动调温器中的比例作用项。

随着误差随时间的积累，积分项也开始对控制器的输出产生作用。在这种反应较缓的过程中误差增加非常缓慢，故积分作用项将最终在输出信号中占支配地位。基于积分器中所累积的误差量，控制器即使在误差消除后，仍将会继续产生输出，此时过程变量有可能超过设置点而产生反向误差。

如果积分作用不是太强烈，则后来产生的误差将小于最初的误差。而且随着正误差积累中负误差量的增加，积分作用将开始逐渐变小。此过程将重复数次直至误差及累积误差消除。同时，根据振荡误差信号的微分（导数），微分项将继续增加其在控制器输出中的份额，而比例项也将随误差信号的振荡而上下波动。

假设被控过程是一个由大型采暖炉供热的小房间温度控制过程，则倾向于对控制器的控制进行快速响应。此时，由于误差存在时间很短，故积分作用将不再在控制器输出中起主要作用。另一方面，当过程为高度灵敏时，由于误差快速改变，故微分作用将在控制器输出中起主要作用。

PID 控制器可能施加的控制量将随控制过程的不同而相应变化，因此 PID 控制器能够较好地完成消除误差的任务，当然只有与每一种具体的应用有良好匹配的情况下才能较好地实现设计功能。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。PID 控制器参数整定的方法很多，概括起来有两大类：一是理论计算整定法。它主要是依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。这种方法所得到的计算数据未必可以直接用，还必须通过工程实际进行调整和修改。二是工程整定方法，它主要依赖工程经验，直接在控制系统的试验中进行，且方法简单、易于掌握，在工程实际中被广泛采用。PID 控制器参数的工程整定方法，主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。三种方法各有其特点，其共同点都是通过试验，然后按照工程经验公式对控制器参数进行整定。但无论采用哪一种方法所得到的控制器参数，都需要在实际运行中进行最后调整与完善。现在一般采用的是临界比例法。利用该方法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下：

1）首先预选择一个足够短的采样周期让系统工作；

2）仅加入比例控制环节，直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡，记下这时的比例放大

系数和临界振荡周期；

3）在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数。

10.11.2　连续控制系统中的 PID 控制

连续控制系统中的 PID 控制规律为

$$u(t) = K_P\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + T_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right]$$

式中　K_P——比例系数；

T_I——积分时间常数；

T_D——微分时间常数；

$e(t)$——偏差；

$u(t)$——控制量。

一个线性连续系统的模拟 PID 控制系统原理框图如图 10-36 所示。

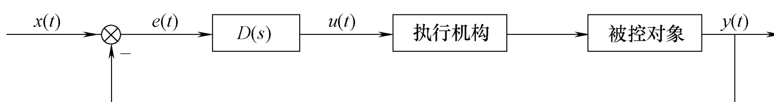


图 10-36　模拟 PID 控制系统原理框图

一个 PID 调节器的比例系数、积分时间常数和微分时间常数一旦确定，该控制器的性能随之确定。

还可以将 PID 调节器的 PID 控制规律表述为

$$u(t) = K_P e(t) + K_I\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau + K_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$$

式中　K_P——比例系数；

K_I——积分系数；

K_D——微分系数。

对时域的 PID 控制规律取拉氏变换，得到 PID 调节器的传递函数：

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D = K_p\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$$

工程上经常采用近似的 PID 调节器传递函数：

$$G(s) = K_P\left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{0.1T_D s + 1}\right)$$

工程实际中常根据受控对象的特性和控制的性能要求，灵活地采用 PID 调节器的不同组合，构成比例调节器、比例积分调节器和比例积分微分调节器，对应的数学描述如下：

比例调节器：

$$u(t) = K_P e(t)$$

比例积分调节器：

$$u(t) = K_P\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)\mathrm{d}\tau\right]$$

比例积分微分调节器：

$$u(t) = K_P\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)\mathrm{d}\tau + T_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right]$$

PID 调节器的控制包括比例控制、积分控制和微分控制。比例控制可以迅速反应误差，并减

小稳态误差。比例放大系数如果过大，将导致系统不稳定。积分控制的作用：积分控制可以对系统误差进行积分，输出控制量，以消除误差。如果积分作用太强将导致系统被调参数动态偏离给定值幅度越大，即超调加大，超调加大到一定程度会出现振荡。微分控制可以减小超调量，克服振荡，使系统的稳定性提高，同时加快系统的动态响应速度，即提高系统灵敏度，提高系统的动态性能。因此选择合适的比例放大系数、积分时间常数和微分时间常数，是实时有效 PID 调节的一个重要内容，并使整个控制系统有良好的性能。

10.11.3　比例调节器的比例带

1. 比例带

比例调节的特点是调节速度快、稳定性好、不易产生过调现象。但此种调节方式在调节结束后仍存在着残余偏差，即调节参数不能回到原来的给定值上。

在实际工程中，常用比例增益的倒数来表示比例调节的输入与输出之间的关系，即

$$u = \frac{1}{\delta}e$$

这里的 δ 就是比例调节器的比例带，比例带 δ 与放大系数 K_c 成反比关系。以电动水阀或风阀的开度控制为例，如果调节器的输出量表示电动水阀或风阀的开度，比例带 δ 就代表使电动水阀或风阀开度改变 100%，也就是开度从 0 ~ 100% 全开情况下被调量的变化范围。在被调量处于 δ 内时，电动水阀或风阀的开度才与偏差成比例。超出这个“比例带 δ”之外，电动水阀或风阀将处于全关或全开的状态，调节器的输入与输出之间的比例关系不再保持。

2. 比例带 δ 对调节过程的影响

给定一个使用比例调节器对某一参量进行控制的系统，系统给以阶跃输入，系统的被控参量变化有一个过渡过程，如图 10-37 所示。当比例调节器的比例带或比例系数选择较为合适时，图中曲线 1 为衰减振荡过程，这是一个正常的调节过程。当比例带选择过小或过窄，在阶跃输入情况下，被控参量变化如图中曲线 2 是等幅振荡过程。比例带选择过窄，即比例放大系数过大，比例调节器过于灵敏。如果比例调节系统的放大系数很大，即比例带非常窄，在阶跃输入情况下被控制的参量变化规律是一个等幅振荡。在比例放大系数很小，比例带 δ 过宽，调节器灵敏度低，在阶跃输入情况下，被控参量变化如曲线 3 所示是一个单调过程。

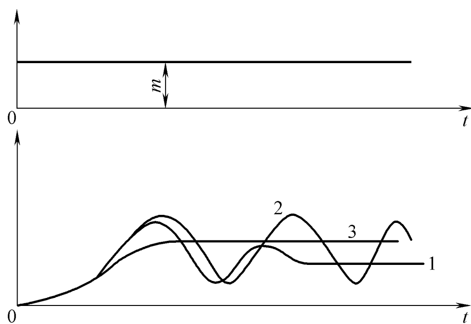


图 10-37　比例调节系统的过渡过程
1—衰减振荡过程　2—等幅振荡过程　3—单调过程

调节器的比例带越大，系统会越稳定，但是静差却也越大，这里的静差，是指过渡过程终了时的残余偏差，也就是被控变量的稳定值与给定值之差，其值可正可负，它是一个表明准确性的重要指标。比例调节系统的比例带越小，则系统的稳定性越差；如果比例带过小，系统就可能出现不稳定现象。

一般情况下，比例带的大致取值范围：温度调节为 20% ~60%，压力调节为 30% ~70%，流量调节为 40% ~80%。

10.11.4　三种调节作用的关系

在控制系统中，微分调节抑制被调量的振荡，具有提高控制系统稳定性的作用；在比例微分

调节中，当比例带一定而微分时间 T_D不同时，其调节过程也不同。由于在比例微分调节系统中微分调节只是比例微分调节的一个组成部分，微分作用的加入可以使控制系统更加稳定，因而允许比例带调整得窄一些，从而可使偏差减小到允许的范围内。

比例微分调节增加了微分的作用，可以提高系统的稳定性，同时可使比例带减小、调节时间缩短。

比例积分调节的效果，可以加大最大偏差和超调量，但静差较小，这是由于积分作用倾向于使系统稳定，同时具有减少或消除静差的作用；比例微分调节动态指标较好，这是由于有了微分作用，增加了系统的稳定性，因而可使比例带减小，调节时间缩短。由于无积分作用，因此仍有静差存在，但由于比例带的缩小，故静差可以减小。

对于 PID 调节器来讲，比例调节输出响应快，只要选择好比例带，会有利于系统的稳定；微分作用可减少超调量和缩短过渡过程时间，可以允许使用较窄的比例带；积分作用能够消除静差，但使超调量和过渡过程的时间长。通过组合比例、积分和微分三种调节作用相互，根据对象的特性，正确选用调节规律，恰当地选择调节器参数，能够获得较好的调节控制效果。

10. 11. 5 闭环控制和位式调节器

1. 闭环控制系统

在开环控制系统中，不需要对被控量进行测量，只根据输入信号进行控制。开环控制系统的控制准确度低，抗干扰能力差，还容易产生振荡，故多用于干扰不强烈、控制准确度要求不高的地方。将系统的输出信号反馈到输入端和外加输入信号一同来实现控制，即由输入信号和输出信号的偏差信号对系统进行控制，就是闭环控制系统，也称反馈控制系统。

由于闭环控制的特点是在控制器与被控对象之间，不仅存在着正向作用，而且存在着反馈作用，即系统的输出量对控制量有直接影响。将检测出来的输出量送回到系统的输入端并与输入信号比较的过程称为反馈。输入信号（又称给定值）与反馈信号（又称测量值）之差称为偏差信号，简称偏差。偏差作用在控制器上，使系统的输出量趋近于给定值。闭环控制的实质就是利用负反馈的作用来减小系统的偏差。

空调系统中的温度、湿度自动控制系统中，多采用闭环控制系统的方式。空调房间的温（湿）度闭环控制由控制对象——空调房间、温（湿）度传感器、温（湿）度调节器、执行器组成。闭环控制系统无论造成偏差的因素是外来干扰（例如环境条件等）还是内部干扰（例如给定值变化），控制作用总是使偏差趋向下降。因此，它具有自动修正被控量偏离给定值的能力，且准确度高、适用面广，是基本的控制系统。

闭环控制系统的特殊性，对前向通道元件的准确度要求不高，因而可以使用低成本的元件构成精确的控制系统；闭环控制系统的输入/输出特性仅由反馈元件决定，因而反馈元件的不稳定将会直接引起输出的误差；闭环控制系统是根据偏差进行控制的，而偏差是借助测量元件得到的，如果测量元件本身不稳定，那么控制系统的准确性就很难保证。

如果一个系统的开环控制是不稳定的，在闭环控制系统中，如果参数选择得不合适，它也可能是不稳定的，甚至会完全失去控制。因此，如果一个系统的输入信号是预先知道的，而且又不受到外部干扰，一般多采用开环控制系统；如果构成系统的元件参数不稳定，又存在无法预计的干扰，则一般多采用闭环控制系统。

2. 位式调节器的主要特性

常用位式调节器的主要特性有：

（1）调节范围

被控对象被控参数调节最大值与最小值之间的范围称为调节范围，调节器在这一范围内工作。

（2）呆滞区

呆滞区又称无感区或呆滞带，是指不致引起调节机构产生动作的调节参数对给定值的偏差区间。如果调节参数对给定值的偏差不超出这个区间，调节器将不输出调节信号。呆滞区宽度在一定程度上可以表示调节器的精确度。

（3）调节器的延迟

当调节对象中安装测量元件处的调节参数（如温度传感变送器处的空气温度）开始变化时，一般需要经过一段时间后调节器才开始相应动作。需要经过的这段时间叫做调节器的延迟。

调节器的时间延迟是调节系统中各主要元件的延迟时间之和。在自动调节系统中，调节系统的延迟是调节对象的延迟（它包括传递延迟和容量延迟）与调节器延迟之和。因此，当对象的负荷发生变化时，要经过一段时间的延迟（称为对象的延迟）之后，在对象流出侧的容量中的调节参数才开始发生相应的变化。在此之后，还要经过一段时间的延迟（调节器的延迟），调节器才能产生相应的调节动作。在这两段连续的延迟时间内，调节参数对给定值的偏差必然增大，有些情况下偏差甚至超出容许的限度。

（4）位式调节器的特性

位式（二位式、三位式）调节规律的调节器称位式调节器，它属于继电器特性的调节规律。

1）双位调节器的特性：双位调节器因其结构简单、动作可靠、操作和维修方便等特点，广泛地应用在舒适性空调系统的室温调节系统中。

在使用双位调节器的自动调节系统中，当执行器在稳定状态时，只能处于两个极限位置（即全开或全关）之一，控制电路只能是接通或断开，调节阀也相应地处于全开或全闭状态。

在全开或全闭之间，电磁阀不会停留在中间的某一位置上。双位调节器的工作过程是一个经常波动的过程，因而使调节对象中的参数（如室温调节系统中的室内温度）经常在上、下两个极限位置之间升降，不可能稳定在中间某一位置上。

2）双位调节过程：在双位调节过程中，空调房间内温度 $T_a(t)$ 呈现周期性的变动，温度波动曲线如图 10-38 所示。

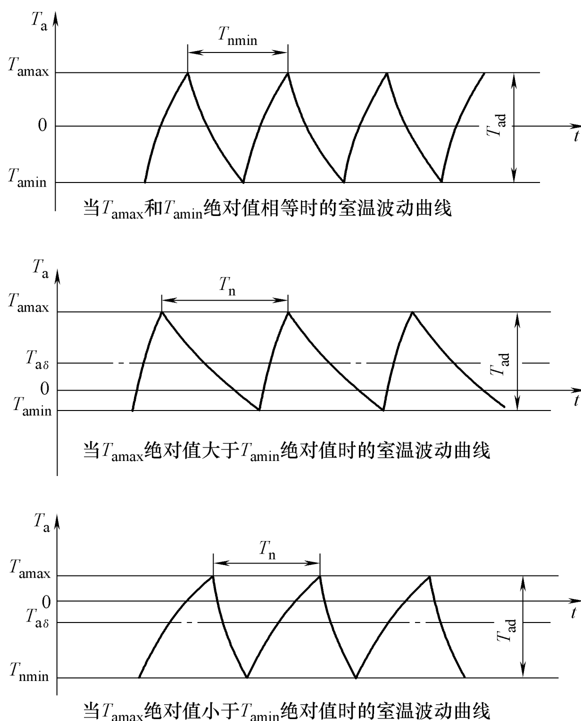


图 10-38　双位调节室内温度波动曲线

空调房间内温度波动范围是 $T_{ad} = T_{amax} - T_{amin}$，其中 T_{amax}是空调房间内温度的上偏差，T_{amin}是空调房间内温度的下偏差。空调房间内温度上下偏差的平均值是 $T_{a\delta} = (T_{amax} + T_{amin})/2$。

图 10-38 中的 T_n为空调房间内温度的波动周期；T_{nmin}是室温波动周期的最小值；T_{ad}是温度的上偏差 T_{amax}与下偏差 T_{amin}之间的差值。

10.12 中央空调系统各子系统的设计要点

10.12.1 冷水机组控制系统设计要点

1. 负荷控制（温度设定、程序设定）

根据供回水温度与流量计算的热负荷计算以及机组当前的累计工作时间，对机组进行起动台数和顺序控制。

2. 差压控制

根据供、回水压差，比例调节旁通阀，保持供/回水的压力平衡，并按拟定程序，发出起/停机组信号。

3. 联锁和逻辑控制

对机组中所有子系统进行联锁和逻辑起/停控制。

起动：冷冻水泵→冷却水泵→冷却塔→制冷机。

停机：制冷机→冷冻水泵→冷却水泵→冷却塔。

4. 监测

供、回水温度、水泵运行状态、制冷机运行状态。

5. 报警、记录

供、回水温度超限，油压、油温超限，水泵及机组故障。

6. 显示、打印

温度、流量、压力参数、设定值及测量状态。

7. 冷却塔系统控制设计要点

1）温度控制（温度设定）：根据冷却塔出水温度，控制风机起、停。

2）水位控制：根据冷却塔水位，控制补水泵或补水电磁阀起、停。

3）监测：进、出水温度，水泵、风机运行状态。

4）报警、记录：温度超限、水泵故障、风机故障、水位低限。

5）显示、打印：温度参数、设定值及测量状态。

10.12.2 新风机组、空调机组及风机盘管控制设计要点

1. 新风机组控制设计要点

1）风机控制（程序设定）：按设定时间程序起、停风机，并与进风阀门联锁，累积运行时间。

2）温度控制（温度、阀门开度、冬夏季转换设定）：根据送风温度与设定值之差，以比例模式控制盘管供水阀开度。冬季时设定阀门最小开度，以维持盘管不冻结最小热水流量。

3）过滤器控制：测量过滤器两侧气流压差，若超过设定值，更新过滤网。

4）新风风阀控制：根据室内新风控制 CO 浓度，控制进风风阀开度。

5）监测：室外新风温度、送风温度、风机运行状态和过滤网状态。

6）报警、记录：温度超限、风机故障、过滤器压差超限、更新过滤器和电动机故障。

7）显示、打印：温度参数设定值及测量状态。

2. 空调机组控制设计要点

1）风机控制（程序设定）：根据设定程序起、停风机，累积运行时间。

2）温度控制（温度设定、冬夏季转换设定）：根据回风温度与设定值之差，按比例积分调

节模式调节供水阀门开度；春、秋季按比例调节风阀，改变新风、排风及送、回风混合比例；根据表冷器温度设限、控制防冻开关。

3）焓值控制：根据回风温湿度、温度计算焓值与设定值之差，控制加湿段起停。加湿段与送风风机起停联锁。

4）过滤器控制：测量过滤网两侧气流压差，若超过设限值，更新过滤网。

5）监测：新风、送风、回风温度表冷器温度、CO_2 浓度、室内湿度、风机状态和过滤器状态。

6）报警、记录：送风温度超限，过滤器压差超限、更新过滤器和风机故障。

7）显示、打印：温度参数、湿度参数、设定值及测量状态。

3. 风机盘管系统控制设计要点

1）温度控制（冬夏季转换设定）：根据室内控制器设定值与室温之差，按比例模式调节供水阀门开度。可选择就地温控模式和联网温控模式。

2）监测：典型室内温度。

3）报警、记录：风机故障。

10.13　部分典型 BAS 的软硬件架构

不同生产厂商推出的 BAS 的软硬件架构差异很大，但不同的架构中还是清晰地勾勒出 BAS 架构的组成规律。下面对较为典型的 BAS 的结构、使用的通信协议和网络体系、DDC 产品、DDC 控制程序的编程软件和编程特点、中央管理工作站平台的集成管理软件及典型的应用举例等方面进行比较，在比较的基础上给出规律性分析。

10.13.1　卓灵 BAS

1. 系统结构

卓灵 BAS 是英国卓灵（TREND）公司开发与推出的一种使用通透以太网的 BAS，其系统架构如图 10-39 所示。

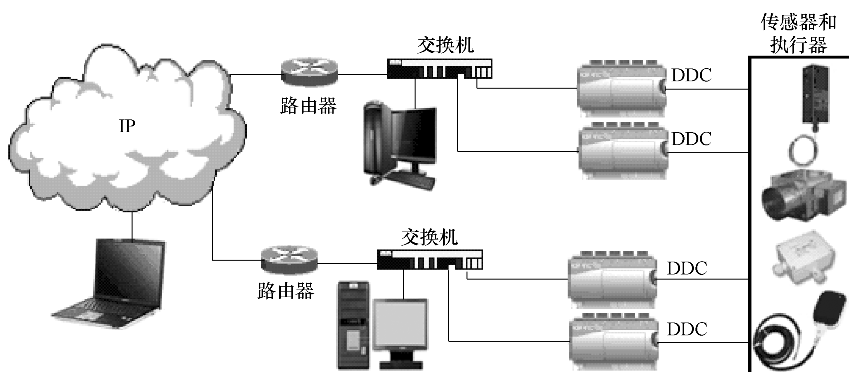


图 10-39　卓灵 BAS 的架构

系统中，中央管理工作站接入一个以太网内，即管理网络是以太网，DDC 也同样接入该以太网，也就是说管理网和控制网是同一个以太网。系统 A 中所有的 DDC 均接入一个星形拓扑的以太网；系统 B 中一部分 DDC 接在星形拓扑的以太网中，另外一部分 DDC（IQ2 控制器）接入一个环形拓扑的以太网中；系统 C 的情况和系统 A 一样。在 BAS 有远程监控的要求时，通过路由器实现和公网的互联，进一步实现远程监控。

2. 通信协议和网络体系

整个系统都工作在 TCP/IP 通信协议环境下，管理网络是以太网，连接 DDC 的控制网络也是以太网。星形拓扑下的以太网遵从 IEEE 802.3 网络协议，环形拓扑下的以太网遵从 IEEE 802.5 网络协议。

通信网络基于 TCP/IP 并以综合布线为基础，网络扩展容易，而控制器与控制器之间是对等网络（Peer-to-Peer）结构，控制器之间没有级别之分，资料存取及互相控制直观快捷。

3. 控制程序编程软件

卓灵 BAS 中的 DDC 控制程序编程软件是 SET 软件，如图 10-40 所示。

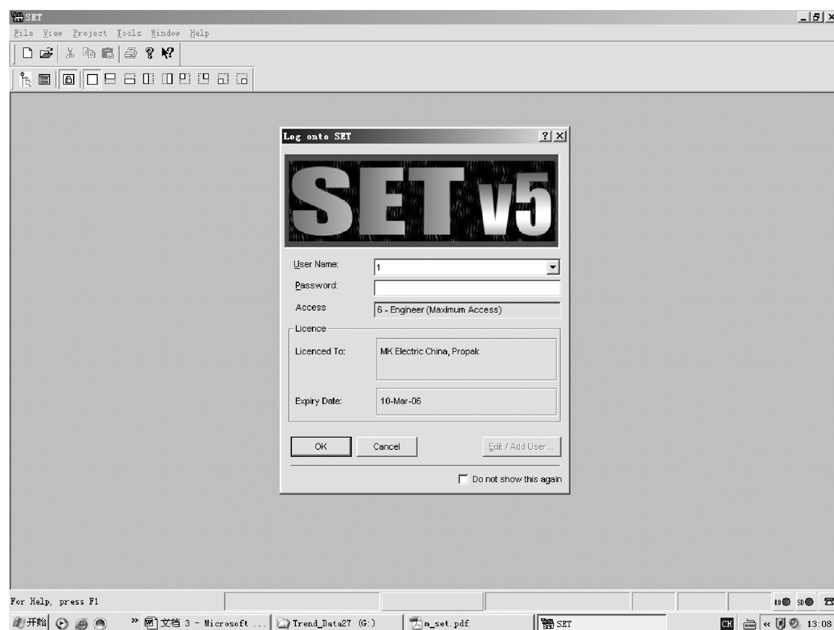


图 10-40　DDC 编程软件是 SET 软件

SET 软件是一个图形模块化的编程软件，它提供了若干个图形模块化的绘图编程功能模块，如图 10-41 所示。

SET 软件的图形元件分为输入模块（Input Bar）、输出模块（Output Bar）、逻辑模块（Logic Bar）、功能模块（Function Bar）、其他模块（Others Bar）五类。

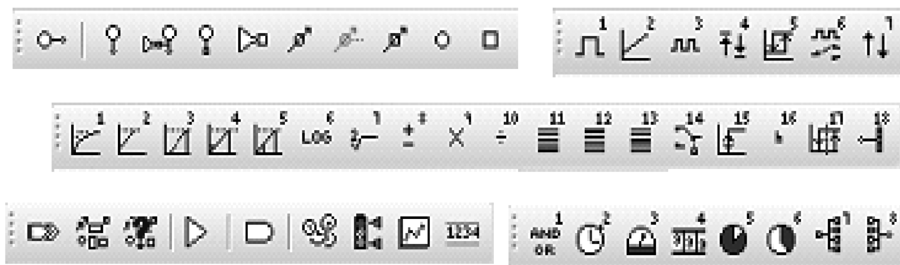


图 10-41　编写 DDC 控制程序的图形化模块

4. 中央管理工作站的管理软件

卓灵 BAS 在中央管理工作站一级采用了 963 管理软件，如图 10-42 所示。963 管理软件提供

了一个 DDC 与操作者图形化的管理界面，对用户提出的操作要求，结合实际设备情况能“量身定做”操作界面，963 管理软件可运行于 Windows NT、Winows2000、WinowsXP 操作系统下。

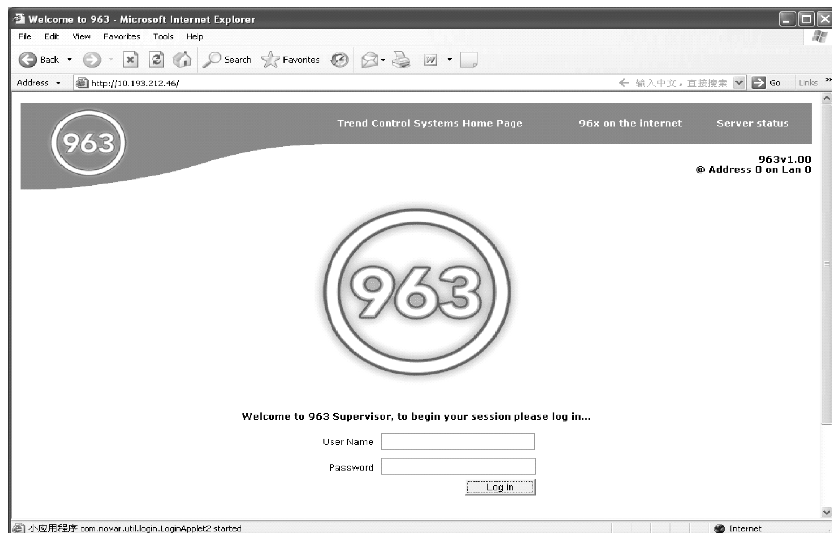


图 10-42　963 管理软件

10.13.2　施耐德 TAC BAS

施耐德 TAC Vista BAS 的一个工作界面如图 10-43 所示。

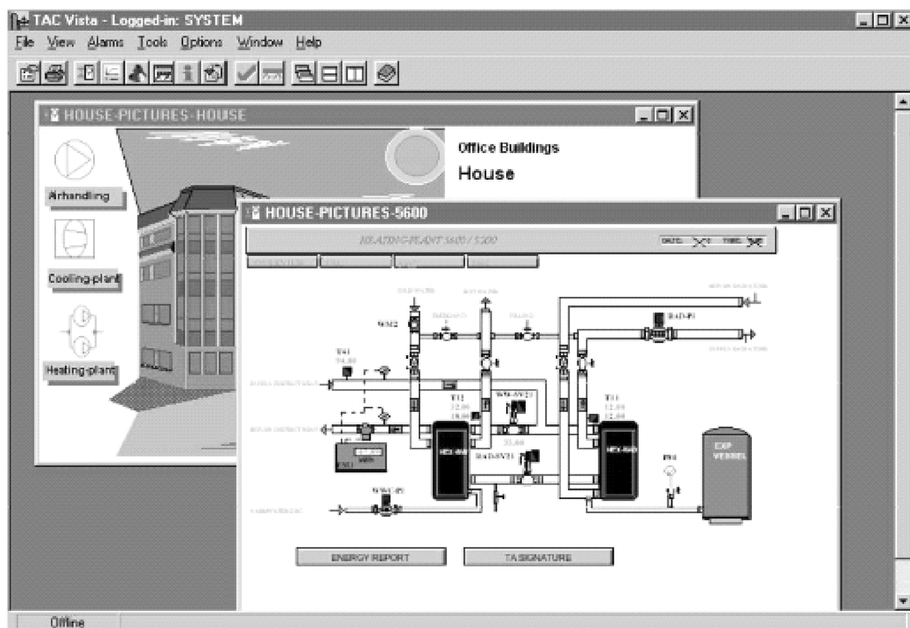


图 10-43　TAC Vista 系统的一个工作界面

1. TAC BAS 架构

施耐德 TAC Vista 系统是基于开放的 LonWorks 技术的 BAS，控制网络使用 LonWorks 网络，通过 LonWorks 路由器把分布在不同建筑内和不同楼层的 DDC 便捷地连接起来。一个施耐德 TAC BAS 的架构如图 10-44 所示。

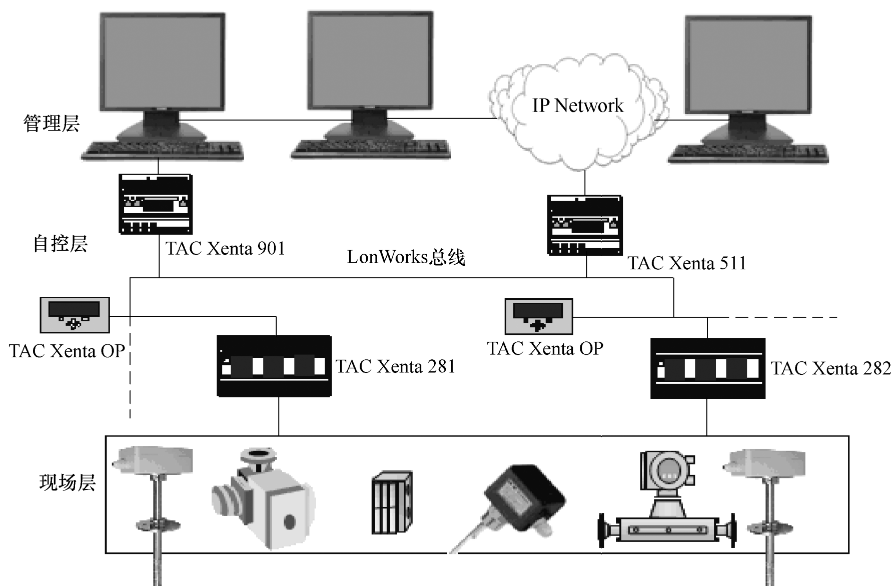


图 10-44　施耐德 TAC BAS 的架构

TAC Xenta OP 是一个小型的操作终端，通过面板与 DDC 连接。使用 TAC Xenta OP，可以读取被监控点的状态。TAC Xenta 控制器可以有不同的配置：可以独立运行；可以和小型的操作终端 TAC Xenta OP 组成小型网络系统。

控制器、OP 和其他设备与合适的适配器组成一个完整的网络系统，连接至 TAC Vista 中央管理工作站系统。

系统结构中较为细致的组件连接关系如图 10-45 所示。

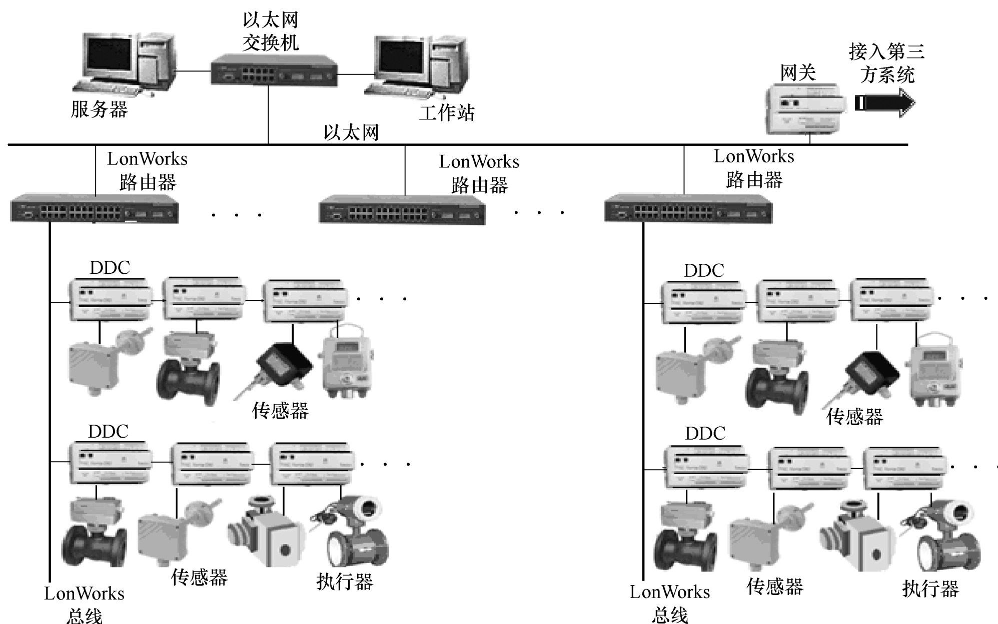


图 10-45　细致的组件连接关系

2. 控制器及编程软件

施耐德 TAC BAS 中的 DDC 是 TAC Xenta 系列控制器。TAC Xenta 系列 DDC 对现场数据（开关量、模拟量）进行采集和处理。两款 TAC Xenta DDC 如图 10-46 所示。



图 10-46　两款 TAC Xenta DDC

TAC Menta 是 TAC Xenta 控制器的编程软件工具。TAC Xenta 也是一个图形模块化的编程软件，在其软件功能模块库中有多种不同功能的图形模块，作为控制程序的基础单元，使用 TAC Xenta 编制 TAC XentaDDC 的控制程序简洁灵活。

TAC Menta 是面向对象的 DDC 编程软件。

3. TAC Vista 系统中央管理工作站平台的管理软件

（1）TAC Vista 系统的中央管理工作站管理软件基本软件包

TAC Vista 系统的中央管理工作站管理软件 TAC Vista V3. 2 User Package（基本软件包）主要功能：

1）基本功能：用于基本的监控操作，如彩色图形监测、报警处理和时间程序控制；

2）网络：在系统多于 1 个工作站时，用于网络配置；

3）趋势记录：生成并显示数据趋势记录（以表格形式）；

4）趋势图显示：为趋势记录数据生成图表。

（2）TAC Vista 系统的中央管理工作站管理软件可选件

TAC 中央管理工作站管理软件可选件（TAC Vista V3. 2 Manager Package）主要功能：

1）记录发生器：用于客户化的记录生成；

2）能源管理：用于能量使用和预算的管理；

3）历史记录：存储 TAC Vista 中的系统事件和报警时间。

（3）TAC Vista V3. 2 Professional Package

TAC Vista 系统的中央管理工作站管理软件还包括 TAC Vista V3. 2 Professional Package 软件包，主要包括以下一些功能组件：

1）彩色图形编辑器：生成并编辑系统彩色图形；

2）IPCL 编辑器：编辑 ICPL，ICPL 是 TAC RPU 系列控制器所使用的一种编程语言；

3）数据库生成器：将应用程序转换为文本文件，以便于编辑和输入至 TAC Vista 数据库。

（4）中央站编程软件和通信软件

TAC Vista 系统的中央管理工作站的编程软件是 TAC V3. 2 TAC Menta，TAC 中央站通信软件是 LonWorks。

4. 通信协议和网络体系

TAC Vista 系统的通信网络是一个两个层级的架构：管理层网络是以太网，控制层网络是

LonWorks 网络，LonTalk 为通信协议。

TAC Xenta 控制器采用非屏蔽双绞线接入 LonWorks TP/FT-10 网络，网络通信速率为 78kbit/s。TP/FT-10 是自由拓扑双绞线信道网络，设备可以用双绞线线缆连接，每个网段的电缆最大长度有限制：在自由拓扑下最大电缆长度为 500m，在总线拓扑下最大电缆长度为 2200m。

现场使用的 TAC Xenta OP 操作终端可以连接至 TAC Xenta DDC。TAC Xenta OP 操作终端带有显示器和按键，用于现场读取控制器数据或改变参数设置。TAC Xenta OP 操作终端可以搭扣在 TAC Xenta 控制器上，也可安装在控制柜前面或作为便携式终端使用。

采用 TP/FT-10 网络时，每个 TAC 网段可以包含 60 个网络节点或 30 台控制器，通信速率为 78kbit/s，总线长度可达到 2700m。可以使用一个延伸器连接两个 TAC 网段来扩展系统容量，使每条总线可以达到 60 台控制器，每台工作站可以有 4 个 LonTalk 适配器以支持 4 条总线和 240 台控制器。

采用双绞线并用总线拓扑的 TP/XF-1250 主干网络时，每条总线可以通过路由器连接到通信速率为 1.25Mbit/s 的 LonWorks 主干上，路由器的数量可以达到 63 个，整个网络可以达到 400 台控制器，主干通过 LonTalk 适配器连接到工作站上。

在 TAC Vista 系统的通信网络中，也可以组建虚拟子网、工作组及域来进行网络优化配置。LonWorks 控制网络的控制器设置位置紧紧相邻被控对象的附近，减少了布线工作量，节省了人力，降低了成本，提高了工作效率，也十分便于调试与维护。

LonWorks 网络通信使用 3120 神经元芯片，中央处理器是 32 位、10MHz 主频的 CPU。为便于不同子系统方便地和 BAS 进行集成，部分需集成的子系统如变/配电、变频控制、电梯等子系统可提供 LonWorks 通信接口，不同的子系统可以方便地、通信透明地连接到 TAC Vista 系统，不需要任何外部网关设备，轻松实现系统集成。

在实际工程当中，不同子系统的通信环境较为复杂，如一些子系统使用 BACnet 或 ModBus 等其他一些国际或工业主流标准协议，如果需要集成，TAC Xenta 提供 LonWorks 网关的集成方案，通过 TAC Xenta 913 网关将 BACnet、ModBus 或 RS-232、RS-485 应用系统的数据集成到 TAC Vista 系统。

10.13.3　METASYS BAS

METASYS BAS 具有较好的开放性，它是一个集中管理、分散控制系统。METASYS 系统具备较强的联网能力，可以与其他愿意开放其通信协议的产品或系统实现联网，因而可以实现不同异构子系统的协调联动。

1. METASYS 系统架构

METASYS BAS 的结构如图 10-47 所示。

图 10-47 中的 N1 网络是管理网络，N2 网络是控制网络，NCU 是网络控制器，用来连接 N1 网络和 N2 网络。

2. 通信协议和网络体系

METASYS BAS 的通信网络架构是一个二层级的结构，N1 网络是第一层高速网络，这里是基于 TCP/IP 的以太网，第二层网络是 LonWorks 控制总线，遵从 LonTalk 通信协议，两层网络之间通过 NCU 实现互联。

N1 网络是以太网，在应用中还可以接成使用 IEEE 802.3 标准的 10（100）Base-T 网络，也可以接成分别遵从 IEEE 802.4 标准和 IEEE 802.5 标准的令牌总线和令牌环以太网，拓扑结构可为星形、总线型或混合型。在三种结构中，星形结构适用于 NCM 与 OWS 操作站位置较远的系统，总线型结构适用于 NCM 与 OWS 操作站位置较近的系统，而混合型结构适用于 NCM 与 OWS

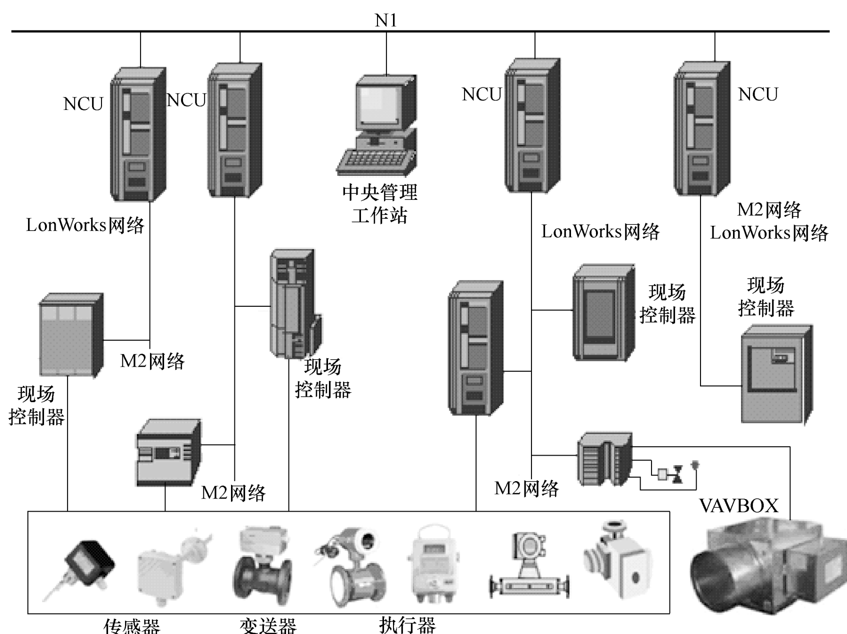


图 10-47　METASYS BAS 的结构

操作站位置有远有近的系统。

N1 网可以使用同轴电缆、双绞线、光纤或它们的组合。NCU 和操作站可以直接支持同轴电缆，并可方便地加上适配器连接光纤回路。每段 N1 网的最长距离取决于所采用的媒质及网络上节点的数量。

3. 控制器及编程软件

（1）网络控制器和现场控制器

网络控制器（NCU）是连接管理层 N1 网络和 N2 控制网络的一个核心设备，可以通过编制程序实现较复杂的功能，可以协调通信网络中各独立的 DDC，为它们提供报警监视和综合控制功能。NCU 可脱离任何上位机（如个人电脑），独立承担控制及通信功能。

NCU 上备有多种标准通信接口，如标准 RS-232 串行总线接口，可连接笔记本计算机和打印机；第二个接口是手提网络终端接口，网络终端像操作站一样，能够存取网络中的所有信息；第三个接口可用于调制解调器，用于远程监视或打印。

系统中的 NCU 网络控制器如图 10-48 所示。

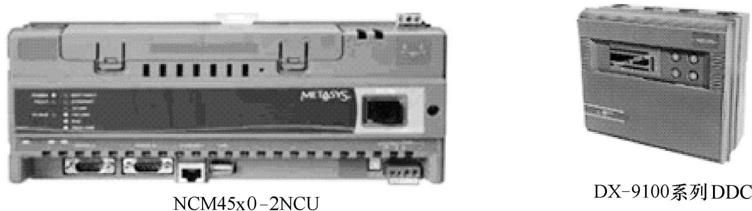


图 10-48　系统中的 NCU 和 DDC

目前最常用的 DX-9100 控制器是一个模块化、可扩展、在现场具有显示及操作能力的控制器。它的基本配置为 8AI、8DI、2AO 及 6DO，共为 24 点，根据现场需要可增加各类型点的扩展模块，最多可扩展 64 个点。

（2）DDC 编程软件

METASYS 系统的 DDC 控制程序采用图形模块化的编程语言，通过图形化编程语言，实现各种复杂的高级算法及协调控制。METASYS 的图形化编程语言以画流程图的方式进行编程，直观、易懂、方便修改。

METASYS 系统为用户提供各种典型应用及控制的 DDC 图形化控制程序，用户可以直接使用，在应用环境不同的情况下，可以修改这些原始的 DDC 控制程序使之应用在新的环境下。

METASYS 系统中，所有 DDC 控制程序，均可由操作站直接下载到 DDC，用户可以从操作站上很方便地修改 DDC 的现场控制程序，并将修改结果再下载到 DDC 中。

用户通过操作站对系统数据所进行的任何增减及参数的修改，均直接存储于网络控制器中，系统的运行并不依赖于操作站。为防止现场数据（存储于 NCU 中）的丢失或损坏，从操作站可实现数据的回传。回传数据保存在操作站硬盘中，作为备份数据。

METASYS 操作站能够直接利用大量的外部图像资源，并加以应用。METASYS 操作站使用了画面生动的管理界面软件。

10.13.4　BACtalk BAS

美国艾顿公司推出的 BACtalk 系统是一个基于 TCP/IP 的 BAS。

1. BACtalk 系统架构

BACtalk BAS 也是一个采用两个层级的 BAS，系统架构如图 10-49 所示。

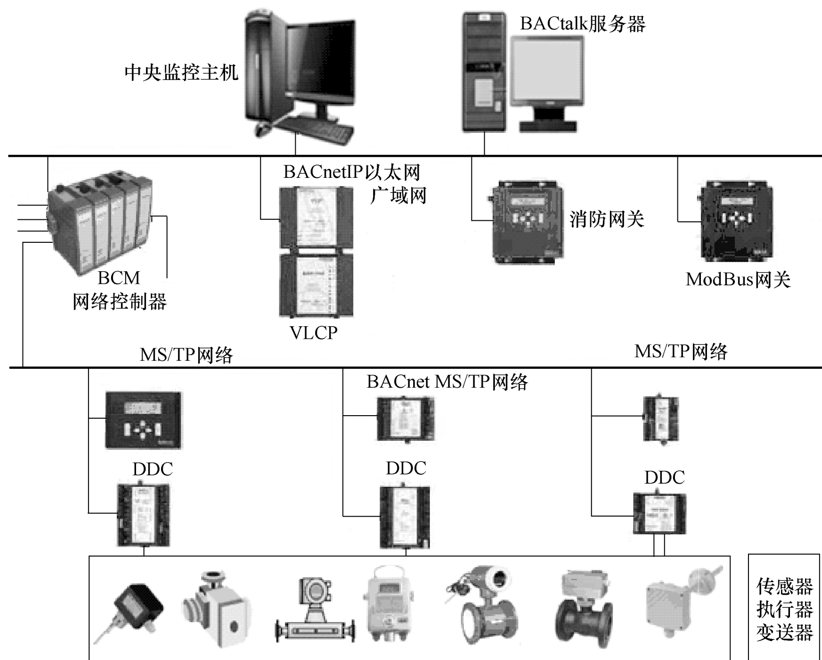


图 10-49　BACtalk 系统架构

图 10-49 中的 BCM 模块是网络控制器（全局控制器），作用是将 MS/TP 网络和以太网实现互联；消防网关是将火灾报警联动控制系统的信息集成到 BAS 中的装置。系统中的 DDC 直接和分布在现场的传感器、执行器和变送器相连。

一般楼宇自控设备从功能上讲分为两部分：一部分专门处理设备的控制功能；另一部分专门

处理设备的数据通信功能。而 BACnet 协议就是要建立一种统一的数据通信标准，使得设备可以实现互通信，并在互通信的基础上实现互操作。BACnet 协议只是规定了设备之间通信的规则，并不涉及实现细节。

2. 通信协议和网络体系

BACtalk 系统的通信网络分为两层：上层管理层网络为基于 TCP/IP 的以太网，控制网络为 MS/TP 控制总线。

BACnet 协议支持 6 种网络结构：

1）以太网；

2）ARCnet（2.5Mbit/s）；

3）MS/TP 子网（76.8kbit/s）；

4）PTP 构建的网络；

5）基于 LonTalk 的 LonWorks 网络；

6）虚拟网络。

BACtalk BAS 的控制网络主要采用了 MS/TP 总线网络。系统中的现场控制器用手拉手菊花链方式接入 MS/TP 总线网络系统中的 BCM 控制器最大可由 8 块不同的功能模块组成，最大可以具有 7 条 MS/TP 总线，最大可以连接 448 个现场控制器。

3. 控制器、网关及编程软件

BACtalk 系统的 DDC 自成一个系列，用于连接管理层网络和控制网络的网络控制器（全局控制器），如图 10-50 所示。



图 10-50　网络控制器（全局控制器）

这里的 BTI 网络控制器和 BCM 网络控制器的区别主要是：每台 BCM 全局控制器最多支持 7 条 MS/TP 现场总线；每台 BTI 全局控制器最多支持 4 条 MS/TP 现场总线。

两款不同的 DDC 如图 10-51 所示，MS/TP 网络中继器如图 10-52 所示。

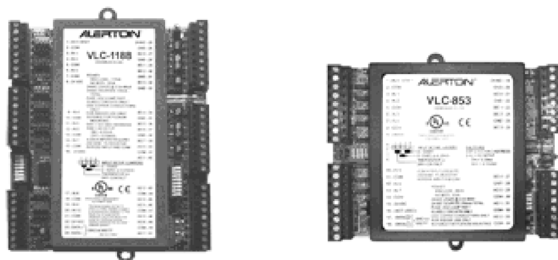


图 10-51　两款不同的 DDC



图 10-52　MS/TP 网络中继器

4. VLC 系列 DDC 的控制程序编程软件

BACtalk 系统配置了一种有着较强功能和使用简便的编程工具，即 VisualLogic。使用 VisualLogic 来编制 DDC 的控制程序。

VisualLogic 包括了一整套功能齐全的功能模块和模型数据库。整个编程软件共有 48 个功能模块，每个功能模块都用一个 3D 立体图标表示，通过有机的连接，可以提供一个非常清晰的控制流程，实现所需要的任何控制序列，并且可以立刻变成存盘资料，方便日后查询。因此，技术人员可在短时间内掌握整个控制原理和编制程序的方法。VisualLogic 图形编程界面如图 10-53 所示。

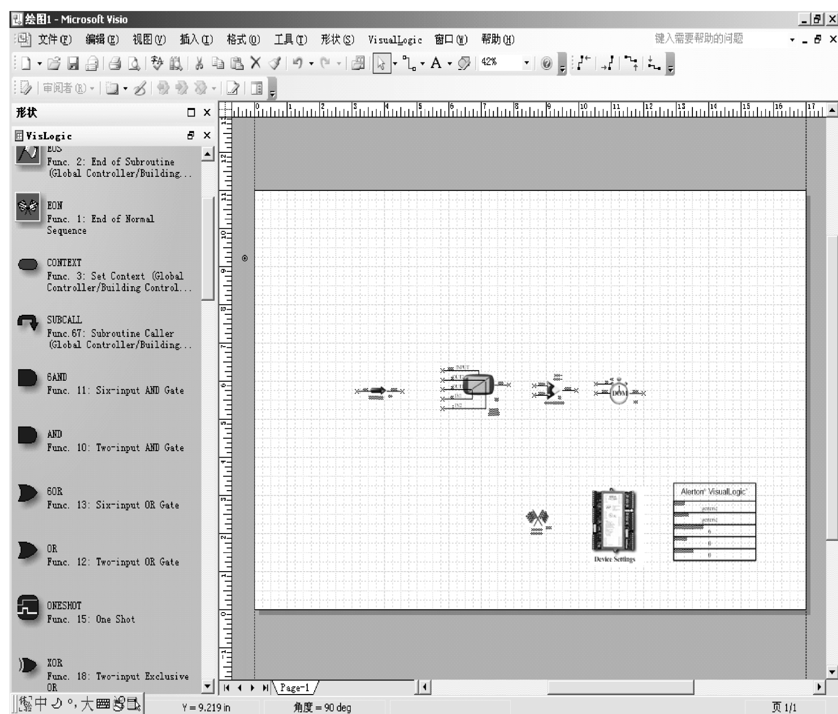


图 10-53 VisualLogic 图形编程界面

在 VisualLogic 图形编程界面中，窗口左侧有序地排列了许多控制程序的组成单元功能模块，呈现一个三维图标方式，调用时只需将功能模块图标拖拽进入右边的工作区即可。

图 10-54 所示的模块组合对应于一个具体的操作序列及应用程序。

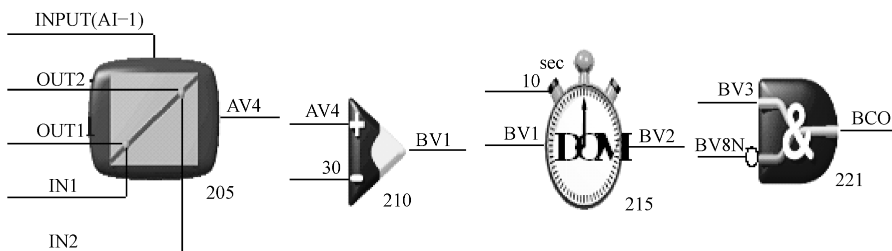


图 10-54 模块组合程序范例

图 10-54 中共有 4 个功能模块，在 VisualLogic 环境中，不需用线段连接这些功能模块，程序执行的顺序是直接按照每个模块右下角的编号，从小到大依次执行，从中可以看出 4 个模块的编

号依次为205、210、215、221、205 模块，它们为线性比例模块。它将输入信号 AI-1 经过线性变换直接输出中间变量 AV-4，接着 210 模块实现比较的功能，当变量 AV-4 大于 30 时，BV-1 输出为 ON，否则为 OF。然后 215 模块实现延时开动作的功能，经过延时 10s，BV-3 动作，最终 221 模块实现与的功能，BV-3 与 BV-8-N 同时为 ON，BO-0 输出为 ON，输出给对应 BCO 的执行机构。由此一个从传感器输入，经过软件编程进行逻辑控制变换，再输出给执行机构的程序就基本编写完毕了。

5. 中央操作站软件 Envision for BACtalk

BACtalk 系统有一个功能强大、容易使用、完全图形化的中央操作站软件 Envision for BACtalk。该中央操作站软件采用三维动态图形显示，使得操作人员可以轻松地监测，控制楼宇系统中所有的设备。

除了显示和控制操作外，Envision for BACtalk 软件提供了全新的用户密码等级、时间计划安排、报警、数据记录、趋势图、能源管理、自动退出、最佳起动时间等强大的功能，使得整个 BAS 操作简捷、安全和节省能源。

同时，Envision for BACtalk 软件中附带系统编程软件包，允许用户自行对系统软件进行编程或修改程序。

BACtalk 采用了 3D 动画显示，提供了“指向—单击”的手段使操作简单直观。可以使用清晰的位图图形和 CAD 程序输入的图形、扫描图形以及任何其他软件制作的图形建立自定义显示。BACtalk 运行平台是 Windows2000/XP，因此多视窗应用软件可以同时运行。可以使用工业标准计算机网络或通过电话线将多个工作站联网。另外它还提供了诸如时间程序、趋势记录、能量记录、用户密码等所有管理功能。操作活动记录可以有效地确保系统安全，防止非法访问。

Envision for BACtalk 的编程包括对上位机界面的编程和对现场控制器 DDC 的编程两部分。上位机监控界面的编程主要是：在选取的被控系统图上设置不同的监测点，或者是数字的，或者是模拟的，并编辑这些监测点的属性，把这些监测点直接和现场控制器的 AI、BI、AV、BV、AO、BO 等直接联系起来，从而能时时监测每一个现场控制器的状态或者远程控制现场控制器的动作。

Envision for BACtalk 为用户提供了 DDC 和 VisualLogic 图形模块两种编程环境，两种不同编程环境在本质上是相同的，编制的程序可以互相转换，只是 VisualLogic 图形模块程序更容易理解，学起来更方便。对于 VisualLogic 编程，主要有以下特点：

1）完全图形化 DDC 编程环境：只需简单的拖放、单击鼠标及连接图形功能模块并设定参数，即可编制出完整专业的 BACtalk 系统控制策略。

2）编程就是画图：在绘制完成图形程序后，编制程序注释文档，简单打印 VisualLogic 图形，保存输出产生一个顺序自动操作。

3）管理硬盘和现场控制器上的 DDC 文件。

通过点击鼠标，下载 DDC 程序文件到现场控制器。同时，也可以从现场控制器上下载 DDC 程序文件到 VisualLogic 软件中，并且 DDC 程序文件被转换为图形方式，便于整理和修改。

Envision for BACtalk 视窗操作软件提供了如下功能：

1）“时间控制程序”：提供日、周、月、年、假日及事件等时程起停管理。

2）最佳起停程序：让机器设备在最佳时刻才起动，实现节能。

3）电力需求管理：精确的管理运行，确保电力供给在经济状态下被使用。

4）可对以区域管理为基础的管理程序提供快速群组型设备名单的设立及管理。

5）警报程序：提供实时警报信息、警报纪录及自动拨号通知重要人员。

6）趋势记录程序：提供对特殊监控点图形及文字趋势记录。

7）能源记录程序：提供图形及文字叙述的每小时或每天能源使用状况，提供进一步拟定节

能策略的思路。

8）报表及打印程序：能够提供丰富的报表内容及文件。

Envision for BACtalk 软件工作界面如图 10-55 所示。

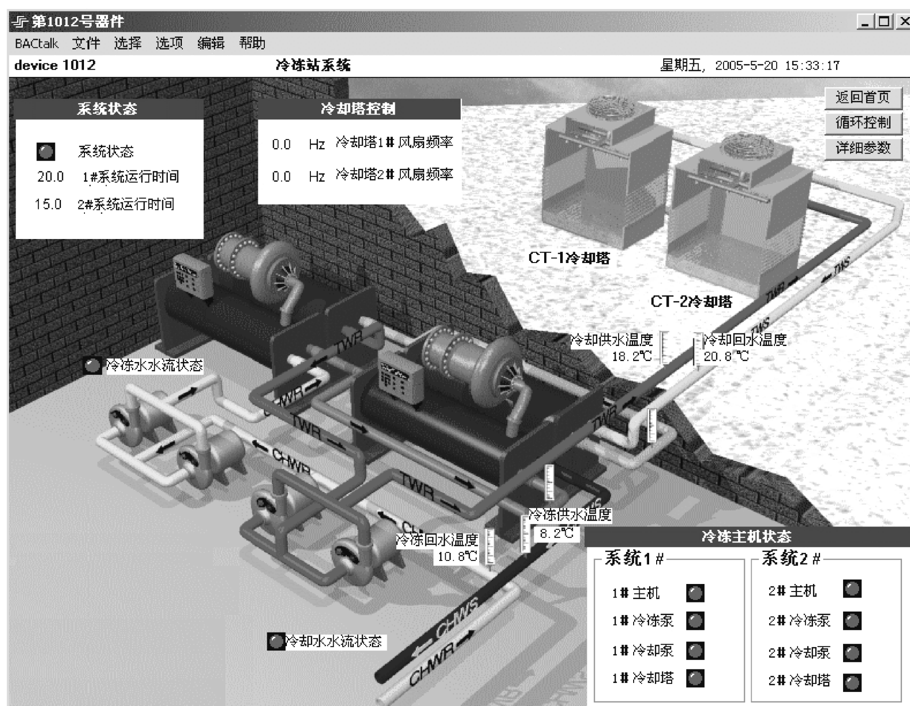


图 10-55　Envision for BACtalk 软件工作界面

10.13.5　西门子 Apogee BAS

西门子 S600（system 600）BAS 是西门子公司于 20 世纪 90 年代推出的 BAS。该系统是以 Insight 图形工作站为核心，与设置在各监控现场的各类 DDC 子站组成的大型集散型 BAS。S600 系统采用多层网络结构，这种集散型分级网络结构可以灵活地进行系统扩展，为用户提供了灵活的最佳控制选择。当前的 Insight 监控软件的版本为 3.6，运行在 Windows 2000/XP 平台上。

1. Apogee 系统架构

Apogee 系统包括：

1）管理平台——Insight（基于 Windows NT/2000/XP）；

2）DDC——MBC/MEC/TEC 等；

3）传感器——温度/湿度/压力/流量/CO_2 浓度等；

4）执行器——阀体/阀门驱动器/风门驱动器。

S600 BAS 的结构如图 10-56 所示。

2. 系统中的 DDC

（1）BLN 楼宇级网络的常用 DDC

BLN 楼宇级网络是控制网络的第一层，这一层上挂接的 DDC 有：

1）模块化楼宇控制器（Modular Building Controller，MBC）；

2）模块化设备控制器（Modular Equipment Controller，MEC）；

3）MBC 上的点终端模块（Point Termination Modules for MBC，PTM）。

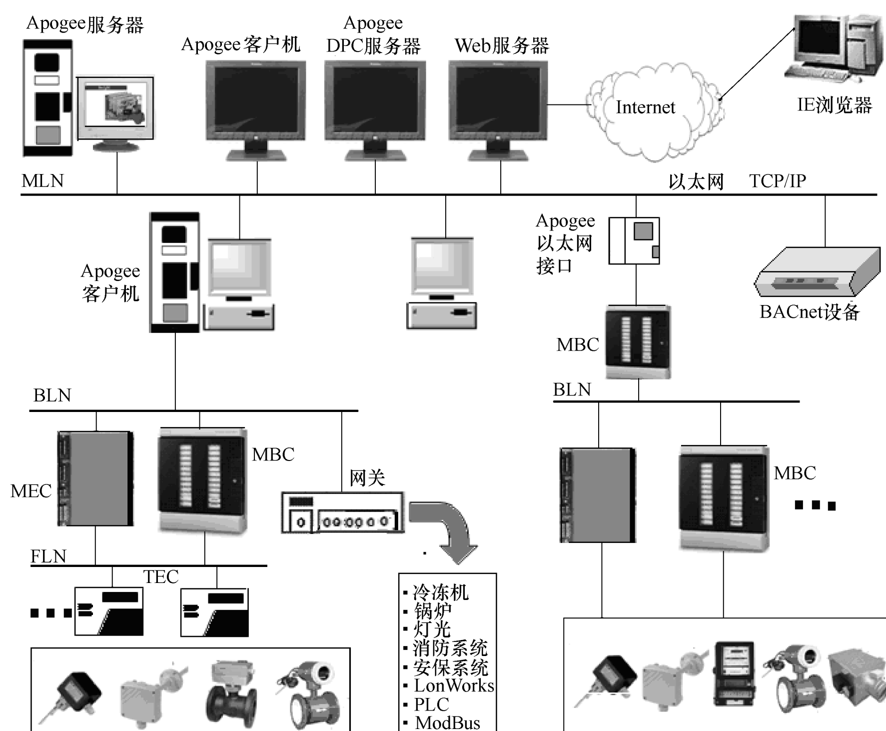


图 10-56　S600 BAS 的结构

（2）FLN 楼层级网络上的常用 DDC

FLN 楼层级网络是控制网络的第二层，该层上挂接的 DDC 有：

1）点扩展模块（Point eXpansion Modules，PXM）；

2）终端设备控制器（Terminal Equipment Controller，TEC）。

（3）TEC

TEC 是楼层级网络上挂接的 DDC，适用于 FCU（风机盘管）控制、VAVBOX（变风量空调机组末端）和热泵控制等。

工作在不同层级网络环境中 3 种类型的 DDC 如图 10-57 所示。



图 10-57　工作在不同层级网络环境中 3 种类型的 DDC

3. S600 BAS 的网络体系

（1）S600 BAS 的三层网络结构

S600 BAS 的 3 层网络结构如图 10-58 所示。

图 10-58 中，最高一级网络是管理级网络（MLN），再下来就是楼宇级网络（BLN），BLN 共有 3 种类型：RS-485 总线、Ethernet 和 Remote BLN。在设备现场还有楼层级网络（FLN）。

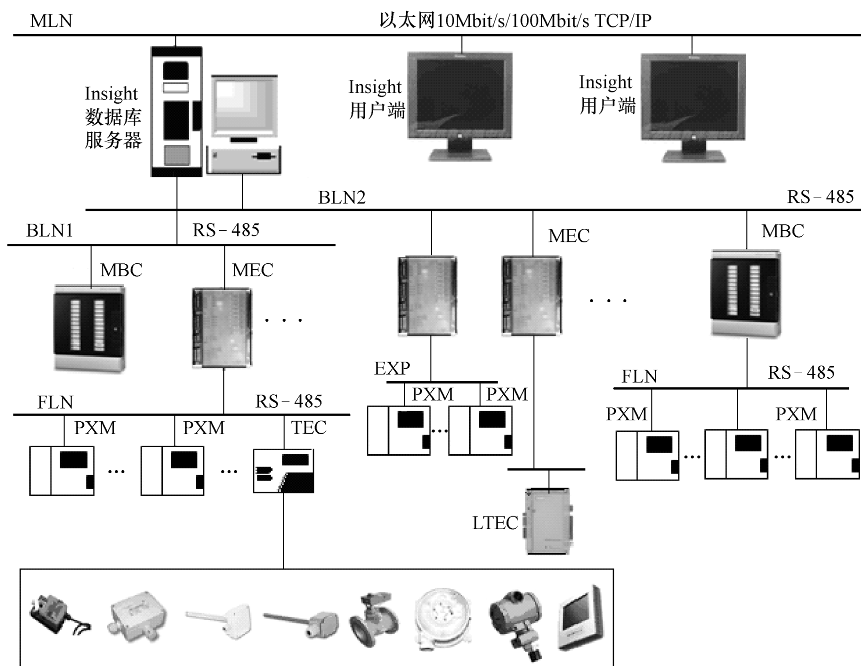


图 10-58　S600 BAS 的 3 层网络结构

（2）BLN

S600 BAS 可用以下 3 种类型的控制总线作 BLN ：RS-485 串行总线、以太网和 Remote 网络。BLN 上的设备类型包括：

1） Insight 工作站；

2） MBC；

3） MEC；

4） RBC；

5） FLNC。

（3）BLN 为 RS-485 总线的情况

在 BLN 为 RS-485 总线的情况，BLN 网络与 Insight 管理平台的连接方式如图 10-59 所示。

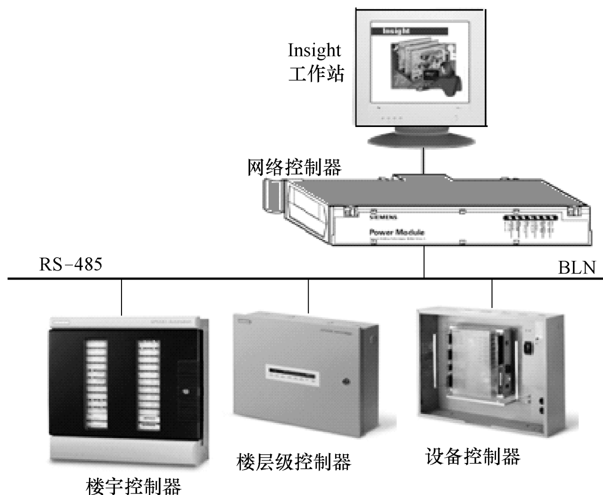


图 10-59　BLN 与 Insight 管理平台的连接方式

使用 RS-485 总线作楼宇级网络连接时，最快通信速度为 115.2kbit/s，最远传输距离为 1200m。每个 Insight 工作站最多连接 4 条 RS-485 BLN 网络，每条 RS-485 BLN 通过干线连接器（TI-Ⅱ）与 Insight 工作站的电脑串口连接。

（4）远程连接时的情况

Remote BLN 是指远程连接，可以通过以太网转换器（AEM200）连接 Insight 工作站，每个 AEM200 都有独立的 IP 地址，基于 TCP/IP 工作，并可以使用楼宇内的综合布线系统。拓扑情况如图 10-60 所示。

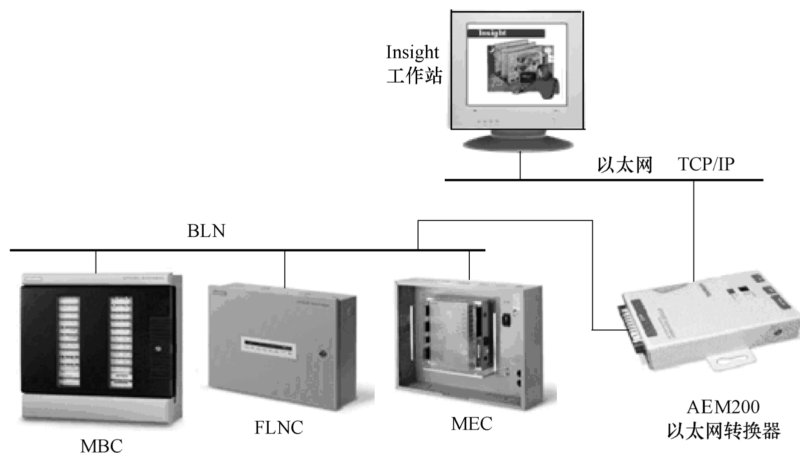


图 10-60　远程连接时的情况

（5）采用以太网作为楼宇级网络的情况

在采用以太网作为楼宇级网络的情况下，系统的结构如图 10-61 所示。系统中的 MBC 和 MEC 都带有以太网的 RJ-45 接口。并直接接入交换机中，也就是说，这些带以太网口的控制器自身已经接入了以太网与 Insight 工作站连接。

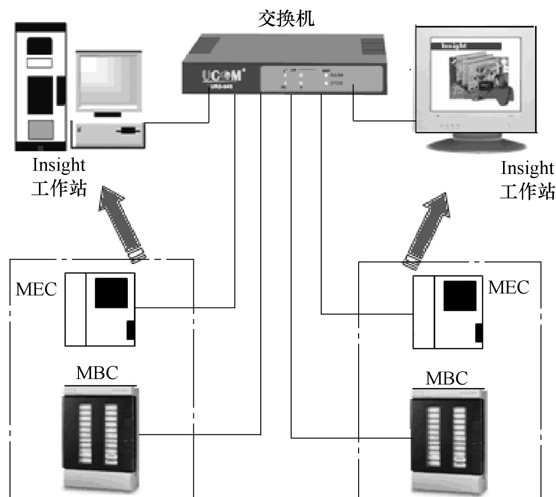


图 10-61　采用以太网作为楼宇级网络的情况下的系统结构

FLN 上挂接的 MBC 或 MEC-1xxxF 或 FLNC 同时支持 3 条 FLN，最大数据传输速率为 38.4kbit/s，通信覆盖范围最大为 1200m。每条 FLN 上最多可连接 TEC、点扩展模块、多功能电

力变送器和 SED2 系列变频器等。

（6）一种新型结构网络

S600 BAS 中一种新型结构网络如图 10-62 所示。系统中的 MEC 和 MBC 是直接挂接在以太网上的 DDC，这样一来网络的结构就较大程度地简化了，该网络的楼宇级网络直接和管理级的以太网合二为一了。

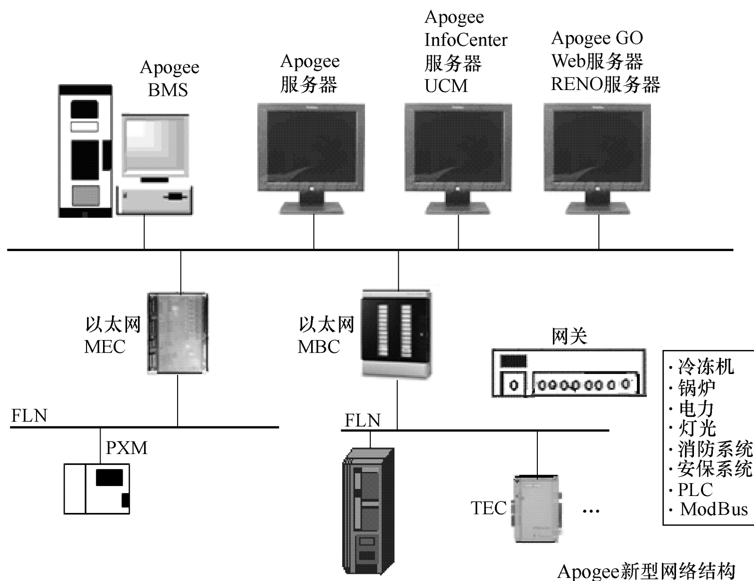


图 10-62 一种新型结构网络

4. Apogee 系统软件

（1）Insight 图形工作站和控制器程序

Apogee 系统是以 Insight 图形工作站为核心，与设置在各监控现场的各类型 DDC 子站组成的大型集散型 BAS。

S600 系统采用的 Insight 图形工作站软件，为用户提供了较好的开发平台及用户界面，内有丰富的图形数据、程序库，便于用户二次开发。Insight 软件包的主要功能是：实时监视、操作和控制楼宇系统网络的所有设备。

模块化现场控制器采用独立的 DDC，内置直接数字控制程序。模块化现场控制器具有以下功能：

1）闭环回路 PID 控制；

2）PID 回路控制参数调节；

3）逻辑顺序控制，内置能源管理程序（以下应用在模块化现场控制器中编辑，输入简单参数后即可执行）；

4）尖峰负载控制；

5）设备激活—停止时间最佳化控制（SSTO）；

6）设备时程表控制（TOD）；

7）节约能源周期控制（DC）；

8）自动日光节约时间切换，无需每年调整。

（2）Apogee 系统的控制软件

Apogee 系统的控制软件包括：

1） NC 及 DDC 进行标准的控制模式：

① 两态控制；

② 比例控制；

③ 比例加积分控制；

④ 比例加微积分控制；

⑤ 控制回路的自动调节；

⑥ 当停电恢复正常后，控制软件将会根据每一个装置的个别起/停时间表，对装置发出起/停的指令。

2） 日常节能控制：根据应用环境制定日常节能控制程序。

① 每日的预定时间表；

② 每年的预定日程表；

③ 假期的安排表；

④ 临时监控安排表；

⑤ 最佳起/停功能；

⑥ 夜间设定点自动调节控制；

⑦ 用电量高峰期的限制；

⑧ 温度设定点的重置；

⑨ 制冷机的组合及次序控制。

第 11 章　系 统 集 成

11.1　BAS 集成概述

11.1.1　BAS 的系统集成

BAS 的系统集成（Systems Integration，SI）是将 BAS 中的不同智能化子系统进行智能连接，实现信息综合、资源共享，实现效率较高的协同运作。楼宇弱电系统涉及的不同子系统多达 20 多个，使用的技术、系统设备和控制软件各不相同。合成一个大系统时，不同的软硬件结合、不同子系统之间的协同运行和综合管理就很困难。于是，具有统一软件平台的集成化管理系统应运而生。

系统集成的概念最初来自计算机网络技术的应用，网络中需要连接的计算机设备多种多样，无论是硬件结构、通信接口、还是操作系统、应用软件，都有很大的区别，异种计算机和异种操作系统的互联难度较大但又是很重要的工作，一般就称为“系统集成”。集成的目标是既要重视子系统本身的协调与优化，又要更追求大系统的协调和总体优化。

BAS 中有若干个功能特点显著的子系统，如计算机网络系统、综合布线系统、通信自动化系统、安全防范自动化系统、消防自动化系统、办公自动化系统、供配电系统等子系统，建筑物内个别局部地区没有实施布线的区域还可以引入无线局域网（WLAN）系统，这些子系统合成为一个大系统，要让该大系统高效运作，并使智能化建筑在运行时有较高的智能性（智商系数），就需要系统集成，系统集成不是诸子系统的简单堆叠合成，而是通过许多“智能接口”彼此“嵌入”的智能化连接，经过系统集成后的智能楼宇是一个优化、高效运作具有较高“智商”的系统。

系统集成的目的是对建筑物内的各智能化系统及相关子系统进行综合管理，实现诸子系统的信息共享，使整个建筑成为一个有一定智能性的高效运行实体。系统集成管理环节具有开放性、可靠性、容错性和可维护性等特点。

BAS 的系统集成设计就是根据用户的需求，优化选择所需的各种产品、技术，并有机地合成为一个完整的相互关联和协调运行的解决方案的过程。

系统集成从设计方面看就是实现最优的综合统筹设计，这种设计不仅仅是简单地为用户提供许多设备、设施并将它们结合起来，而是从整个建筑的结构、系统、服务和管理等智能建筑本质的 4 个方面综合进行设计。系统集成的设计和工程实施能够直接地创造和体现一种附加值。这种附加值的大小取决于系统集成设计与施工水平的高低。

在 BAS 的系统集成中，使用计算机网络技术和现代通信技术为核心，将 BAS 中的各智能子系统作为基本环节，对语音、数据、图像以及监控信号经过统一的筹划设计，用结构化的综合布线系统作桥梁，再同公共通信网相连，通过协调各类系统和局域网之间的接口和协议，将分离的设备、功能和信息载体综合成一个完整的系统。

系统集成是对软、硬件及多元化信息整合的过程，其设计包括：设备的优选，系统软件的集成设计，应用软件的集成设计、管理，组织环节的配合集成等诸方面的内容。

完整的 BAS 的系统集成工程应满足以下一些要求：

1）综合运用各智能化子系统的功能，满足用户提出的功能要求。

2）在各种智能化设备之间建立相应的通信接口，提供所需要的数据通道和数据转换处理。

3）对软件、硬件和多元化的信息流动，实行统一控制和管理。

4）为智能楼宇的管理人员提供友好统一的用户界面，实施各种控制，管理操作便捷方便。

5）将智能楼宇中的多元化信息、数据、参数存储在读取方便的数据库中，支持整个系统的高效率运行、支持高效率的管理。

系统集成的水平在一定程度上制约着智能楼宇的智能化程度，具体地表现在智能化子系统间的智能耦合程度上。系统集成在本质上就是进行功能集成、技术集成、子系统集成、物理系统集成和应用功能的集成。

在传统建筑中，设备、消防及保安自动化系统与通信、办公自动化系统都是以各自独立的子系统出现，系统之间无法沟通，无法协调工作。智能建筑则利用计算机网络和通信技术，将智能建筑的 BAS、CAS、OAS、SAS 和 FAS 等组成部分中的语音、数据和图像以及监控信号构成统一的数据流，利用贯穿在大厦内外的结构化综合布线系统为传输介质，再通过协调各个系统和局域网之间的接口和协议，把各自独立的设备、功能和信息有机地连成一个协调的整体。因此，智能大厦的建设首先就需要一个完善的智能控制系统集成解决方案。

系统集成在一定的意义上还可以讲是一种实现诸子系统联动和智能化综合的协同技术，在进行系统集成的过程中，首先做好优化的综合统筹设计，将各个分离的设备和独立的子系统、功能和信息集成到相互关联、统一协调的系统中，使资源达到充分共享，实现高效、集中和便利的管理。

11.1.2　系统集成概念的扩充

系统集成的本质就是追求和实现最优化的综合统筹设计；系统集成的核心是诸子系统的协调联动集成、功能集成、异构网络集成和软件界面集成，其最重要、最基本的功能是实现信息资源的全局性统一集成管理。

集成系统关键在于实现部分关联度高的子系统之间的互联互通和操作性，解决各类子系统之间的接口、协议、系统平台、应用软件和其他相关子系统、建筑环境、施工配合、组织管理及人员配置等各类面向集成的问题。

系统集成总体分为设备集成、技术集成和功能集成 3 个层面。设备集成是产品集成，该层集成方法是各个子系统的选择和大系统的结构组建；技术集成是对系统内的各个子系统进行技术上的统筹、搭配运用；功能集成是从功能的角度考察产品与技术并合理地调配各项功能，使系统整体功能实现最优化。

系统集成还可以分为；子系统纵向集成、横向集成和一体化集成 3 个层次。子系统纵向集成保证各子系统具体功能的实现；横向集成主要实现各子系统的联动和协调运行的优化；一体化集成基于横向集成，建立智能集成管理系统（IBMS）。

系统集成的作用主要有：

1）使用统一的软件界面，对各机电子系统进行统一的监测、控制和管理。

2）实现诸子系统的协同联动。

3）系统参数、运行及管理数据实现共享。

4）提高整个系统的工作效率及性能水平，降低运行成本，简化管理维护过程。

集成化系统的应用软件是沟通整个系统的关键环节。

BMS 是一体化集成系统即 IBMS 的基础，也是智能建筑系统集成的核心所在。故以下探讨从 BMS 入手，以 BMS 为中心，在其基础上再进行大系统的扩展。

11.2 系统集成的特点和系统集成的基本思想

11.2.1 系统集成的特点

BAS 集成也应具备：先进性、开放性、实用性及经济性。BAS 中有若干控制子系统、信息传输、处理子系统等，系统集成有以下一些特点：

1. 系统集成是多子系统集成

在结构化布线的基础上，计算机网络系统、通信系统、BAS、安防系统、消防系统以及办公自动化系统的硬件设备多种多样，涉及的技术不尽相同，各子系统涉及的协议接口也不相同，在进行系统集成设计时，就要基于这样的多设备、多协议、多接口、多技术、多控制等通信软件系统进行技术集成。接口、协议的对接集成、控制通信软件的对接集成、设备集成。系统集成是多子系统的软、硬件方面的对接集成。

2. 集成中的横向、纵向层次关系

系统集成设计要充分考虑诸子系统的制约关系，根据系统运行中，不同子系统的横向、系统内部的纵向层次关系；各个子系统性能及应用，进行系统集成设计。

智能建筑基于现代建筑技术、计算机技术、通信技术和自动化技术基础，并且集纳了这些科学技术中的最新部分，这些不同的技术相互交叉和渗透，还涉及标准化技术。

3. 对整个系统进行统筹规划设计

建立通畅的诸子系统间的数据信息通道并建立协调控制的联动。

11.2.2 系统集成的基本思想

要充分认识到：诸子系统集成为一个大系统后，会表现出大系统才具备的特性，这种特性叫整体实现性。大系统特性决定智能建筑的整体性能及智能化程度，因此将诸子系统进行优化集成，是提高智能建筑智能化程度的主要途径。

系统中各子系统是开放的，集成后的大系统也是开放的。这种系统集成有一个网络环境的支持。为保证 BAS 的开放性，可采用 TCP/IP 作公共协议，也可以采用 BACnet 协议《楼宇自动化控制网络数据通信协议》或 LonWorks 通信协议进行集成。系统集成后，在与楼宇的主干网络连接和广域网的互联上都留有一定数量的预留标准接口。集成管理软件也以模块结构方式进行开发，使得服务过程有极大的灵活性。

由于工程实施环境的多样性，有些问题还存在争议，如在 BAS 集成中，是采用 TCP/IP、BACnet 还是 LonWorks 通信协议，设备底层是直接采用以太网，还是采用 LonWorks 网或其他的控制网络等。

进行集成的设计时，应充分考虑投资能力，如果一次性投资过高，则可以将系统集成的实施分几个阶段进行，但基本控制子系统和综合布线的建设是必需的，要一次到位，其他的自动化子系统可以逐步到位，但一定要有一个系统化的设计，防止由于分阶段实施带来损失。

楼宇自动化集成系统结构中，视频监控系统、供配电系统、照明系统、空调系统、电梯系统、给排水系统、消防报警系统和安防系统经集成后，形成一个管理层级，具有服务管理、资料管理、设备管理、监测管理、系统保护、库存管理、客户管理、数据存储和图形显示等功能。

在进行系统集成的过程中，并不是要将所有的子系统或分散的设备都纳入到集成系统中，要特别注意关联程度的概念，就是说：在进行系统集成中，首先要将与 BAS 整体关联程度最高的子系统或设备纳入集成体系中，其次是将那些与 BAS 有一定关联程度的子系统或设备纳入集成

体系中，到最后如果有个别子系统或设备与整个 BAS 关联程度不高或者说关系不密切，那么这个子系统或设备就可以不考虑纳入集成体系中去。举例说，有一个无线消防报警系统，完全可以独立地应用在任何场所，与 BAS 整体的关联程度不大，因此该设备就不进入集成体系中。这个观念很有效，它可以指导制定优化的系统集成方案，可以使系统集成变得简约化。

11.2.3　BAS 集成的步骤

在进行 BAS 集成的过程中，始终注重以下原则：

1. BAS 集成的原则

这些原则有：

1）保持技术先进性。

2）系统具有开放性。

3）系统运行中的各种操作具有安全性。

4）有最好或接近最好的投资效益，即系统集成是经济合理的。

5）集成后的系统便于管理。

6）可扩充性好。

2. BAS 集成的步骤

BAS 集成设计的步骤如下：

（1）系统集成分析

内容包括：用户需求分析及方案前调研，初步方案设计；方案可行性论证。

（2）BAS 集成设计

内容有：总体设计、详细设计、实施规划。

（3）BAS 集成实施

内容包含：软件配套设置、购置设备；安装调试（含软、硬件和设备调试）。

（4）系统集成评价

内容有：试运行管理、系统调整和系统验收。

（5）集成系统运行管理及维护

11.3　系统网络结构设计和系统集成的水平层次

BAS 一般有三级控制和两级网络结构。现场采样控制部件采用 DDC，也可采用全数字化智能数字传感器，功能更强，具有一定的通信功能。监控级网络控制器也叫设备子系统工作站，常选用工业现场控制总线如 LonWorks 等。这个层级居于管理层级和现场层级之间，它接收和执行管理层级发送的控制指令，使现场级的 DDC 执行检测、控制指令，同时对现场级的信息进行实时管理，如存储、转发、报警和打印等。

11.3.1　系统网络结构设计

BAS 集成的网络结构设计分为主干网络设计和各局部网络设计。在智能建筑中，有多种网络并存，如局域网、电话网、有线电视网（有单向和双向的区别）和控制网络。主干网络是楼宇通信主干通道，覆盖整个楼宇，是各子系统信息、数据的流入流出通道。主干网一般要求具有大容量、高速率特点，并要求通用化和标准化。

对于局部网络设计，应考虑：

1）将局部网络作为相对独立的子网，要与主干网兼容。

2）子网可包括若干局域网，用路由器、网桥实现互联。

3）子网应有自己的网络管理和服务。

11.3.2 系统集成的水平层次

在实际工程中，由于投资和技术原因，智能楼域中的网络结构设计的水平受到限制，形成以下 3 种水平层次的 BAS 的集成：

1）由于资金和技术要求水平不高，无系统集成，各子系统分立运行，各子系统通过局域网构成基本网络环境。

2）以某一个子系统强化其功能，将其他子系统的集成信息汇入该子系统进行综合处置和管理。

3）由系统集成商以专用的客户机/服务器系统开发集成系统。

11.3.3 系统集成的信息流及信息单元矩阵描述

有些学者对系统集成进行理论描述方面做了很有益的工作，他们这样描述集成系统中的信息流向和数据转换：集成系统信息流分为横向和纵向信息流，纵向信息流是指子系统内部及其与中央集成平台之间的信息流动和融合；横向信息流是指各子系统之间的跨系统联动和融合。信息分为检测和控制信息，监测类信息自底层设备指向中央监控主机方向侧流动；控制类信息自中央监控主机方向指向底层设备方向流动。

1. 系统集成中的信息数据流及传输

信息在流经不同网络层级或者完成从一个异构网络流向另外一个异构网络时，常常会伴随着数据组织方式的转变。数据的逻辑表示方法、报文格式或数据类型都可能发生改变。

系统集成中的信息数据流及传输的情况如图 11-1 所示。

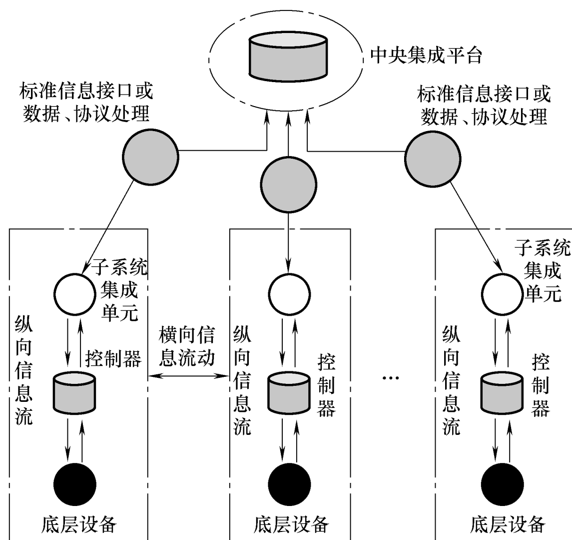


图 11-1 系统集成中的信息数据流及传输

2. 纵向信息数据

可以将系统集成中的信息数据及处理方式用 n 维线性空间的矩阵元表示。系统中不同的监控点所携载的信息可以构成一个信息组，用一个子矩阵块表示。

设整个系统有 m 个子系统，即有一个 m 维的列向量，系统用 $\boldsymbol{Z}(m_i)$ 表示：

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix}$$

式中　z_1——子系统 1；

z_2——子系统 2；

…

z_m——子系统 m。

也可以表示为

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} \\ z_{22} \\ \vdots \\ z_{mm} \end{bmatrix}$$

式中　z_{11}——子系统 1 的监控点信息组，也是一个列向量，具体含有多少个矩阵元由实际系统决定；

z_{22}——子系统 2 的监控点信息组；

…

z_{mm}——子系统 m 的监控点信息组。

每个子系统可以设置子系统集成单元，接收各个传感器采集的数据信息并进行适当处理，如重复数据较多可以进行数据融合。m 个子系统向中央集成平台单向传送待处理的信息数据。每个监测点的数据信息可以用一个属性矩阵来存储。

3. 横向信息

m 个子系统之间可以进行互通信和互操作的横向信息也可以用一个线性空间中的向量来表示：

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_m \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{12} \\ \boldsymbol{x}_{13} \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}_{1m} \end{bmatrix}, \boldsymbol{X}_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{21} \\ \boldsymbol{x}_{23} \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}_{2m} \end{bmatrix}, \cdots \boldsymbol{X}_m = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{m1} \\ \boldsymbol{x}_{m2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}_{m(m-1)} \end{bmatrix}$$

式中　$\boldsymbol{X}$——m 个子系统彼此之间的信息数据横向传递矩阵；

$\boldsymbol{X}_1$——第 1 个子系统与其余（$m-1$）个子系统信息数据交互的矩阵子块；

$\boldsymbol{X}_2$——第 2 个子系统与其余（$m-1$）个子系统信息数据交互的矩阵子块；

$\boldsymbol{x}_{12}$——第 1 个子系统与第 2 个子系统信息数据交互的矩阵子块；

$\boldsymbol{x}_{13}$——第 1 个子系统与第 3 个子系统信息数据交互的矩阵子块。

⋮

余类推。

每一个带有控制环节的子系统都有自己的状态空间模型：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_i = \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{B}_i u_i \\ \boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{D}_i u_i \end{cases}, i = 1, 2, \cdots, k$$

式中 $\boldsymbol{x}_i$——第 i 个控制子系统的状态变量；

$\boldsymbol{u}_i$——第 i 个控制子系统的外输入；

$\boldsymbol{y}_i$——第 i 个控制子系统的输出向量；

$\boldsymbol{A}_i$、$\boldsymbol{B}_i$、$\boldsymbol{C}_i$和$\boldsymbol{D}_i$——第 i 个控制子系统的系统矩阵、控制矩阵、输出矩阵和传递矩阵。

各个子系统主要使用常规控制的方式，也可以是智能控制方式。由于空调系统尤其是变风量空调机组及其控制系统是典型的非线性多变量的复杂系统，用常规控制方法实施控制时，当工况发生移动时，一些设定的控制参数就不太适宜新的工况状态了，使用智能控制方法可以很好地应对工况移动造成控制系统控制性能下降的问题，比如 PID 调节器就是一个典型的例子，PID 调节器用于常规控制场所中是很有效的，但对于非线性的多个输入和多个输出的复杂系统，设定好的 PID 参数随着工况移动而变得不合适了，智能 PID 调节器的诸参数可以随着工况移动而移动，从而能够有较优良的控制性能。

以上将系统集成的信息数据用数学模型及数据库进行描述及管理的方法有以下优点：

1）有助于系统集成的标准化：没有标准化，不同的系统集成商在集成内容上具有随意性，将会导致系统尽管实现了集成但具有很强大的封闭性，开放性变差。

2）使用数学模型和数据库，将提高系统集成资源的共享，各个不同的 BAS 有很多的信息数据是完全可以共享的。

3）使用数学模型和数据库有助于降低系统集成设计、施工的难度，因为计算机系统处理数据模型和数据库的效能比人工方式高得多。

11.4 BAS 集成的技术模式

从 BAS 集成的技术模式来讲，主要有以下 5 种技术模式。

11.4.1 以 BMS 为中心的集成模式

BAS 集成系统又称 BMS 集成系统，它是以开放的 BAS 为核心，广泛实现与消防报警控制系统、安保系统等子系统的综合集成，并具备与 CAS 系统和 OA 系统的基本集成功能和实现更为广泛集成基础的系统。

11.4.2 采用 BACnet 或 LonWorks 技术的模式

BACnet 是楼宇自控数据通信协议标准。制定该标准的基本目标为在技术上定义一个开放的 BAS 结构，实现不同系统的互联和互操作；还有一个目标是使用户可自主地选择最佳的产品设备及服务，可自主地选择系统集成商；在系统升级维护上不限于特定厂商，充分保护用户已有投资。目前只是 BAS 采用 BACnet、LonWorks 协议，其他系统，如 FAS、SAS 需开发特定功能的网关才能与 BAS 互联。BACnet 与 LonWorks 是关于测控网络通信的优秀技术，适于大区域、监控点分散的控制系统，但不适合 FAS、SAS。

11.4.3 直接在以太网环境下进行系统集成

采用 10Mbit/s 的 10Base-T 作为楼宇级通信的主干网，标准统一、技术成熟，易于集成和扩展，通过网桥或路由器还可方便地与其他局域网或 Intranet 互联，方便地实现远程通信和远程监控。在这种模式中，SAS、FAS 的信息数据如果不是数字化的和开放性的，也无法将它们的信息集成到 BAS 中去。

11.4.4 采用数据库集成模式

在BAS集成中，主控制器级采用统一的通信协议，对同一层级网络进行互联，使同层级网络上不同子系统实现互通信、互操作和信息资源共享。在这种集成模式中，楼宇自控一级采用网络服务器。

还可以采用数据库集成方式，即在SAS、FAS和BAS层级上建立管理系统，通过数据库集成技术对各子系统的数据库进行动态集成，来实现对楼宇内各子系统的数据集成管理和联动控制。这种集成模式的核心是楼宇内各子系统首先建立自己的控制网络并保留“上位管理主机”，这里的“上位管理主机”指系统集成中负责子系统的监控、管理的完全开放式数据、信息管理主机。每一子系统层级网络作为下层现场控制网络，再建立集成系统上层管理网络。由于这个高层级网络的工作数据量大，可采用诸如100Mbit/s的快速以太网，各子系统的“上位管理主机”接入此高速以太网。各子系统的“上位管理主机”完成下层控制网和上层集成管理网之间的协议、数据格式的转换，同时保留自身的独立监控管理功能。国外许多优秀的系统集成商采用这种数据库集成模式。新加坡的通达国际公司推出了I3BMS集成新模式，这是一种基于Intranet的浏览器/服务器模式，在Intranet网络环境中进行了BAS、OAS和CNS（通信网络系统）的集成，并用Web服务器和浏览器这种开放的交互方式来实现集成运用。

从现实的情况看，智能楼宇的系统集成已从BMS升级到IBMS（Intelligent Building Management System，智能楼宇管理系统）。

11.4.5 采用OPC技术及ODBC技术实现智能建筑系统集成

随着智能建筑的功能需求不断增长，楼宇内各种各样机电设备的监控系统的种类和范围不断扩大，对应的监控子系统可能采用不同的网络平台、不同的通信协议。为实现BMS系统集成时解决子系统互联和互操作的问题，主要采用以下方式：

1）采用统一通信协议实现系统集成；

2）采用协议转换实现系统集成；

3）采用OPC技术实现系统集成；

4）采用ODBC技术实现系统集成。

前两种方式前面已经论及，下面主要讨论后两种方式。

1. 采用OPC技术实现系统集成的方式

OLE对象链接和嵌入是用于应用程序之间的数据交换及通信的协议。允许应用程序链接到其他软件对象中。用于过程控制的OLE就是OPC。OPC主要解决应用软件与过程控制设备之间的数据的读取和写入的标准化及数据传输等功能。

OPC是过程控制的工业标准。即使数据的种类不同，这套程序都能将这些资料整合。该程序采用的是微软的DCOM（分布式组件对象模型）结构技术，并已迅速成为将数据由建筑物的自动化设备送至信息管理系统的工具，不需要重新开发数据集成接口。OPC服务器容许网络上OPC客户直接连接中央集成系统的数据，使客户能更快、更有效地取得实时数据。作为OPC客户端使用时，用户可用其他的OPC服务器连接中央集成管理软件。

OPC提供信息管理域应用软件与实时控制域进行数据传输的方法，提供应用软件访问过程控制设备数据的方法，解决应用软件与过程控制设备之间通信的标准问题。当设备通过OPC互联时，图形化应用软件、趋势分析应用软件、报警应用软件等应用软件均基于OPC标准，现场设备的驱动程序也均基于OPC标准。在统一的OPC环境下，各应用程序可以直接读取现场设备的数据，不需要一个一个地编制专用的接口程序，各现场设备也可直接与不同应用之间互联。OPC的重要作用是使设备的软件标准化，从而实现不同网络平台，不同通信协议、不同厂家的

产品方便地实现互联和互操作。OPC 技术的完善和推广，为智能建筑系统在实时控制域与信息管理域的全面集成，提供了良好的软件环境。采用 OPC 技术实现系统集成将会成为一种建筑智能化系统集成的主要方式之一。

2. 采用 ODBC 技求实现系统集成的方式

ODBC 是一种应用程序访向数据库的标准接口，也是解决异种数据库之间互联的标准，目前已被大多数数据库厂商所接受。该标准适用于各种数据库。ODBC 兼容的应用软件通过 SQL（结构化查询语言），可查询、修改不同类型的数据库。这样，一个单独的应用程序，通过它可访问许多个不同类型的数据库及不同格式的文件。ODBC 提供了一个开放的、从个人计算机、小型机、大型机数据库中存取数据的方法。使用 ODBC，开发者可开发出对于多个异种数据库进行并行访问的应用程序。现在，ODBC 已成为客户端访问服务器数据库的 API 标准。只要被使用数据库支持 ODBC 技术规范，无论其数据库的类型如何，均能进行信息交换。采用 ODBC 及其他开放分布式数据库技术实现系统集成，也是智能建筑实现系统集成的重要方式。

如果将 OPC 技术与 ODBC 技术作以比较，可以发现 OPC 技术现在比 ODBC 技术更为成熟、产品更多，而且我国已有比较成熟的 OPC 技术和产品。所以目前采用 OPC 技术实现系统集成，可能会比采用 ODBC 技术实现系统集成更为广泛一些。两种技术的融合与补充，将会使系统集成技术加快发展。

智能建筑系统集成一般来说，应该具备以下方面条件：计算机网络的条件、计算机应用软件的条件、机电设备单机及子系统智能化的条件、系统集成技术的条件。只有在这些条件基本具备的情况下，才有可能实现智能建筑的系统集成。

OPC 标准将 COM 技术引入过程控制和工业自动化等应用领域，通过 COM 组件在软硬件之间提供了一套标准接口，只要双方都支持此标准就能通过相关配置实现通信。OPC 接口标准分为：

1）OPC 数据访问接口；

2）OPC 报警和事件接口；

3）OPC 历史数据访问接口等。

基于 OPC 的集成模式的核心内容为：中央监控站作为 OPC 客户端，在这个 OPC 客户端和各个下层子系统之间开发设置一个 OPC 服务器，保证该 OPC 服务器与 OPC 客户端使用的是相同的 OPC 标准，实现各子系统之间以及各子系统和 OPC 服务器、OPC 客户端之间的通信。

有学者认为能够满足当前应用需要的智能建筑系统集成模式从结构上可以分为两大类：一类是基于并行处理思想的分布式并行集成模式；另一类是基于 OPC 技术的组件化集成模式。

基于 Web 及 IP 网络的系统集成也是极有发展潜力的模式。

11.5 BACnet 体系下的系统集成

11.5.1 BACnet 体系在系统集成中具有的优势

基于 BACnet 体系的系统集成是由于 BACnet 体系具有以下一些特点：

1. 具有很好的开放性

BACnet 标准的开放性不仅体现在对外部系统的开放接入，而且具有良好的可扩充性，不断注入新技术，使 BAS 在规模上和技术层级上不因发展而受限制。

2. 互联特性和扩充性好

BACnet 标准可向其他通信网络扩展，如 BACnet/IP 标准可实现与 Internet 的无缝互联。

3. 应用灵活

BACnet 集成系统可以由数个设备节点构成一个小区域的自控系统，也可以由很大数量的设备节点组成大的自控系统。

4. 应用领域不断扩大

在开放环境下，由于具有良好的互联性和互操作性，由最初的仅用于暖通空调设备系统成为适用于楼宇设备的各个领域的标准，如给排水、照明系统和安防系统等。

11.5.2　BACnet 系统集成方法

使用 BACnet 协议是实现楼宇各系统集成的基础。随着楼宇内各个以计算机/微处理器控制为基础的设备日益增多，要实现系统集成，各厂家按 BACnet 标准通信协议来生产开发 BAS 的相关硬件产品和应用软件，可以方便地接入到一个协调的大系统中。BACnet 是一个标准通信及数据交换协议，不同厂家生产与 BACnet 兼容的控制器或接口，最终达到不同厂家控制器可在这一标准通信通道上互相交换通信数据的目的。

可使用多种网络结构组成基于 BACnet 协议的 BAS。如将网络控制器及路由器直接挂在以太网上，与计算机工作站同层级。在网络控制器或路由器下通过 MS/TP 通信网连接各 DDC，上层是计算机和网络控制器及路由器，而下层是 DDC。在网络控制器及路由器下的 MS/TP 通信网的数据传输速率可达到 76.8kbit/s，满足 DDC 与 DDC 间的通信及交换数据需求。

由于网络控制器及路由器直接挂在以太网上，扩展容易，而数量不受限制。数据处理只取决于计算机硬件配置。

MS/TP 网可通过网络中继器扩展距离及覆盖范围，使 DDC 对各设备进行监控更为灵活。

通过将各子系统的信息资源汇集到一个系统集成平台上，通过对资源的收集、分析、传递和处理，从而对整个大厦进行最优化的控制和决策，达到高效、经济、节能、协调运行状态，创造一个舒适、温馨、安全的工作环境。

将楼内的机电设备及相关子系统集成起来，做到可以在同一人机界面下对所有机电设备及子系统进行监视、控制和管理，提高管理效率，节约能耗，延长设备使用寿命，降低整个大厦的运行成本。

良好的系统集成可做到无缝隙集成。无缝隙的集成系统就是通过使用统一、标准的通信协议使系统具备开放性和互操作性，并且提供全面的、端到端的解决方案。开放性具有两层含义：一是指通信协议不为任何公司所独有，任何制造商都可以利用该通信协议标准开发自己的产品，产品不仅可以单独销售也可以作为整体方案的一部分提供给用户；二是指系统满足楼宇的功能需求，易于扩展，并且可以兼容不同厂商的同类产品，允许用户选择质量更佳、价格更具竞争力的产品进行更换。互操作性是指设备在子系统内使用点对点的通信方式来共享信息，在子系统间不需网关和协议转换器等附加设备就可以实现信息的交换。

端到端的解决方案是指通信协议的应用还必须是全面的、系统的，它应该可以应用到所有的子系统。任何厂家都可以按照 BACnet 标准开发与 BACnet 兼容的控制器或接口，在这一标准协议下实现相互交换数据的目的。

BACnet 采用面向对象技术，在 BACnet 应用系统中，对象就是在网络设备之间传输的一组数据结构，网络设备通过读取、修改封装在应用层协议数据单元（APDU）中的对象数据结构进行信息交换，实现互操作。通过广播自身所包含的特定对象的名称，BACnet 设备可以建立与所含相关对象的设备建立联系。因此 BACnet 协议要求每个设备都要包含“设备对象”，通过其属性的读取就可以让网络获得设备的全部信息。

为了确定不同 BACnet 设备之间的互操作性，BACnet 还提供了 PICS 文件，它包括 8 项内容，即标识厂商和描述设备的基本信息；设备符合 BACnet 的级别；设备所支持的功能组；设备所支

持的基于标准或专有的服务；设备起动或响应服务请求的能力；设备所支持的基于标准或专有的对象类型及其属性描述；设备支持的数据链路技术；设备支持的分段请求和响应。

BACnet 协议在人机界面和现场设备间或不同系统的现场设备间可以直接进行信息传输而无需特别附加设备。BACnet 和 LonWorks 是目前国内构建集成系统中最常采用的两种通信协议，两者都以满足开放性和互操作性为目的。在智能楼宇的系统集成方面，BACnet 具有 LonWorks 不具备的优点：

1. 高速率和高吞吐量

BACnet 系统集成方法通过以太网作为主干网络，用于解决数据传输量较大的系统间的集成。与通信速率较低的总线应用系统相比，更适合大数据量的通信，因而能够大大提高整个系统的性能。LonWorks 主要用于解决数据传输量较小的现场控制器之间的集成，它实际上是一种工控网技术，它的优点在于方便现场仪器，如传感器、执行器等的联网，以及支持多种通信介质的使用甚至是混合使用。总的来说，LonWorks 很适用于实时控制领域，特别是在设备级的互联，而 BACnet 适用于信息管理领域，特别是在上层网之间的互联。

2. 功能更强大

前面讲了 BACnet 定义了 23 个对象，其中包括模拟输入、模拟输出、命令等。另外 BACnet 还定义了 13 种功能组，包括时钟功能组、时间响应功能组、文件功能组、虚拟终端功能组、设备通信功能组等。为精简信息量，BACnet 定义了 6 个一致性类别（设备类别），一致性类别的分级编号由 1 ~ 6 级别依次升高，每个类别都规定了设备要实现的最小服务子集且包含低级别的所有服务。

3. 互联网扩展更灵活

在 BACnet 网络拓扑中，设备之间只存在一条逻辑通路，无需广域网的最优路由算法；其次，BACnet 具有单一的局部地址空间，所以 BACnet 参照 OSI 模型制定了简化的网络层协议，向应用层提供不确认无连接的数据单元传送服务。每个 BACnet 设备都被一个网络号码和一个 MAC 地址惟一确定。

4. 系统具有良好的可扩充性

BACnet 标准没有限制 BACnet 系统中设备节点的数量，BACnet 集成系统可以由几个设备节点构成一个极小的自控系统，也可以形成一个规模很大的系统。

从功能上讲，楼宇自控设备分为两部分：一部分专门处理设备的控制功能；另一部分专门处理设备的数据通信功能。BACnet 协议通过建立统一的设备通信标准，将控制网络和信息网络集成于一体，并使设备间具备互操作性。因此 BACnet 应用系统具备以下明显的优点：

（1）实时性

现场监控信息与运营管理系统实时通信。通过 BACnet 及局域网，操作人员可以快速地通过统一的、友好的图形界面获得所需内容，如对控制网络的工作状态进行远程监视与控制。

（2）综合性

实现控制网络与信息网络的信息集成，使建立分布式的综合实时数据库成为可能，保证了数据的一致性、完整性和互操作能力。

（3）高效性

实现控制网络与信息网络的信息集成，才能充分利用各种信息并结合专家系统等各种智能控制高级算法提供辅助决策，达到优化设备运行、提高物业管理效率、增强建筑物的利用与服务功能。

（4）方便性

在 Intranet 内部或通过 Internet 就可以对控制网络进行远程诊断和维护以及进行新版软件的升级等。

（5）开放性和扩展性

服务功能的增加或改变，只需对系统进行模块级的调整，并且保证兼容性。

（6）经济性

设备间互操作的实现可使多个子系统共享一个传感器或控制设备，可大大减少系统中传感器和控制设备的数量，从而降低成本；设备间的互操作也使业主不再被厂商所限制，具有更大的选择空间，同时开放的市场竞争也势必带来成本的降低。在楼层级网络上提供内嵌 BACnet/IP 的 DDC，可在 10Mbit/s/100Mbit/s 以太网上运行。控制器可独立或联网完成复杂的控制、监视和能源管理工作，还可连接楼层级网络上的设备，并提供中央监控功能。

BACnet 系统集成包含的内容有：构造 BACnet 自控网络、BACnet 自控产品选型和资源配置等。基于 BACnet 标准定义的概念和原理，不同的系统集成商在自控产品选型和资源配置方面可采用不同的组合，因此系统集成的内容也就彼此不同。利用 BACnet 标准进行 BAS 的集成灵活性很大，在厂商提供的软件工具的帮助和导向下，来完成网络配置。

11.6　智能楼宇系统集成工程应用实例

11.6.1　某标志建筑的智能化系统集成工程

1. 工程概述

某标志建筑是北京市的标志建筑之一，属于国家一级风险文化博物馆型单位，其建筑设施中藏有较大量的体现中国古文化及文化发展的精美展品，对弱电系统进行集成时要充分考虑满足展品安全及满足展品现场艺术效果好的要求，同时使整个建筑设施高效运行。整个弱电系统包含了以下一些子系统；楼宇监控和大厦管理、门禁磁卡、停车场管理、消防报警、安防监控、闭路电视监控防盗报警、保安巡更、灯光控制、背景音乐与紧急广播、程控交换机和微蜂窝等系统，综合布线系统作为建筑内诸子系统运行的一个基础性通信网络。

在一级以太网上连接了多达 64 台中央工作站和 200 多台网络控制器，每台网络控制器可连接多达 254 台 DDC 现场控制器。网络系统采用客户机/服务器运行模式、分布式服务器结构。整个集成都是基于 BAS，系统本身包括：空调、热交换、冷冻机、给排水、送排风、变风量空调系统、变配电和照明系统的监控，还进行了系统功能扩充，将保安巡更系统、门禁磁卡系统、演播大厅监控系统纳入系统中；同时还将火灾自动报警、闭路电视监控、模拟显示和办公自动化系统纳入集成中。

2. 系统集成完成后的功能

（1）运行情况通过灵活的文本、图形表格方式实时显示

对楼宇设备进行集中控制和管理。

（2）集中监视功能

对于机电设备运行状态进行监视及故障报警。

（3）集中控制管理功能

对于空调、热交换、冷冻、给排水、送排风、变配电和照明进行监控，实现优化控制、日程表管理、能源管理，可进行直接参数设定。

（4）消防报警系统通过 RS-232/485 串行通信口向 BAS 传递信息

内容有：系统全机运行状态、故障报警、火灾报警探测器工作状态、探测器地址信息、相关联动设备的状态等。发生火情时，在集成工作站自动显示响应的报警信息，包括火警位置及相关联动设备的状态。这里的相关联动还应包括：联动打开报警区灯光，闭路电视监控系统切换报警

画面到主监视器，所在分区的其他画面同时切换到副监视器，并同时启动录像机录像。

（5）集成中的安防系统

在集成自控系统上完成对安防系统的监控和管理。发生事件时发出定时报警信号，工作站上显示警报发生点信息，同时系统联动灯控系统，使报警区联动灯打开灯光。系统联动电视监控系统切换报警画面到主监视器，所在分区的其他画面切换到附监视器，同时启动录像机。

3. 说明

深入分析各子系统功能及相互关系，是各子系统互动互用，在一定程度上还实现了系统间功能共享，使系统功能得到充分发挥。集成系统的功能共享不同于系统资源共享，是非常有意义的事情。

系统构成在统一的管理环境下，操作人员对整个建筑全面管理，系统整体性能全面提高。工程实施中，感受到系统集成的难处较大，各专业厂家的系统设备技术含量参差不齐，系统的开发程度不一，这些因素都给系统集成带来了很大困难。

进行系统集成时，要充分认识到系统内子系统异构的情况：

1）硬件平台的异构。

2）操作系统的异构，系统内不同的主机装有不同的操作系统。

3）数据库管理系统的异构。

4）开发工具的异构。不同应用系统的开发工具或软件语言不同，如应用程序可以使用汇编、C、C + + 、VC + + 、VB、Delphi、Java 等不同的编程语言软件开发。

联动关系也是制定集成决策中的重要内容。联动关系举例如下：发生火灾报警时，空调机送风设备强行关闭；发生火灾报警；发生火灾报警时，工作电梯和生活电梯迅速迫降至一层平层；发生火灾报警时，将火警相近区域摄像画面切到安防监控系统的主监视屏；发生非法侵入时，视频监控系统的监控主画面切换到发生警情的区域。这些都是常见的一些联动规则，也是常用的集成决策中的一部分。

4. 系统集成方案

利用先进的楼宇管理系统实现对消防、CCTV、安防、门禁、停车场、电梯控制和灯光管制等子系统的实时数据集成，并完成各子系统之间的联动控制，使管理人员通过楼宇管理系统的工作站就可以得到全部弱电系统的实时数据。在管理层级，使用 SQL Server 数据库，使用了微软公司的 OLE（对象链接嵌入）、ODBC（开放数据库互联）等技术，具有 Web Server 功能，可方便地与 IE 浏览器、Excel、OA 系统、物业管理系统进行数据交换，实现管理数据的系统集成。

11.6.2　某大厦建筑智能化管理系统中的系统集成案例

1. 系统概述

某大厦是一幢装备了较完整的建筑智能化系统的智能大厦，智能大厦的核心技术是对信息的采集、传输、处理进行综合管理，即对信息进行集成管理。对信息进行集成管理是通过弱电系统集成来实现的。构造一个统一的信息平台，以实现各应用子系统的统一监控和管理。基于成熟、先进、实用的原则，把构成智能建筑的弱电各子系统集成一个相互关联、完整和协调的综合系统，使系统信息资源高度共享和优化使用系统信息资源。

2. 系统集成工程设计的目标和原则

系统集成工程设计将遵循以下目标和原则：

（1）标准化设计

工程设计及其实施严格按照相关的国家和行业有关标准进行。选用的系统、设备、产品和软件将尽可能符合工业标准或主流模式。

（2）保持先进性

整体方案及各子系统方案保持一定程度的先进性。在技术上适度超前，所采用的设备、产品和软件不仅成熟而且在业界有较先进的技术水平。

（3）兼顾合理、实用和经济性

在保证先进性的同时，以提高工作效率，节省人力和各种资源为目标进行工程设计，充分考虑系统的实用和效益。

（4）开放性好

集成后的总体结构具有良好的开放性，结构呈模块化特点，具有很好的兼容性和可扩充性，既可使不同厂商的设备产品综合在一个系统中，又可使系统能在日后得以方便地扩充，并扩展其他系统厂商的设备产品。

3. 使用 BMS 模式进行系统集成

（1）以 BAS 为平台实现各子系统的集成

集成系统是将分散的、相互独立的弱电子系统，在相同的环境、软件界面中进行集中监控和管理。用户可以监视和观察设备的起动、停止，事故状态和模拟参数的量值等，这些设备将以对象的形式按需要的模式显示在屏幕上。在统一的管理界面下，能够对 BAS、安防系统、消防系统的被监控参量进行统一管理。

（2）BMS 集成中对 BAS 中的被监控参量

BAS 中的被监控参量主要有：

1）室内外温湿度、空气质量值。

2）给排水系统中的水箱水位状态、水泵的运行状态、故障状态的检测。

3）新风机组中的送风湿度、送风温度、过滤器压差开关状态、加湿阀开度、电动两通阀开度、风机故障状态、风机运行状态。

4）空调机组中的防冻开关状态、回风湿度、风道温度、过滤器压差开关状态、加湿阀开度、电动两通阀开度、风机故障状态、风机运行状态、空气质量值、防冻开关状态、调节风口控制值。

5）电梯控制系统中的电梯故障状态、电梯运行状态、上下行状态、停层状态。

6）冷冻站系统中的水泵故障状态、各种设备、运行参量、执行器的运行状态。

7）供配电系统的主要电量运行值。

（3）BMS 集成中安防系统的被监控参量

1）各类探测器工作及执行器的工作状态。

2）门禁系统的状态监测。

3）巡更系统工作状态监测。

（4）BMS 集成中消防报警联动控制系统中的各类传感器、设备的工作状态监测

（5）实现不同子系统的联动，提高整个楼宇智能化系统性能

不同子系统的联动楼宇智能化控制的水平：上班时 BAS 将办公室的灯光、空调自动打开，保安系统立刻对工作区撤防，门禁、考勤系统能够记录上下班人员和时间，同时闭路电视监控系统也可由摄像机记录人员出入的情况。当大楼发生火灾报警时，BAS 关闭相关区域的照明、电源及空调，门禁系统打开房门的电磁锁，同时停车场系统打开栅栏机，尽快疏散车辆。不同子系统的联动只有在集成系统中按实际需要设置后才能实现，这就极大地提高了楼宇的综合管理水平。BMS 通过对各子系统的集成，可有效地对大楼内的各类事件进行全局联动管理，同时可以通过编制时间响应程序和事件响应程序的方式，来实现楼宇内机电设备流程的自动化控制，节省能源消耗和人员成本。采用集成智能建筑物管理系统，系统间的联动方式几乎是任意的，联动方式可

以编程，能够根据用户的需求设定，如闭路电视监控系统与消防报警联动控制系统的联动控制。

联动控制内容丰富，如防盗报警信号可以联动报警区域的摄像机，将图像切换到控制室的监视器上，并进行录像；多个报警信号出现时，报警信号可以顺序切换到不同的监视器上，报警解除后图像自动取消；在防盗系统设防期间安装测控器的区域发生非法入侵时，闭路电视监控系统自动切换到相应区域显示该场景的视频图像等。

4. 系统网络结构及通信

在系统中使用通信网关实现和各子系统的通信连接，然后转变为统一的数据格式向网络上发布。它可以适应不同类型的接口和数据格式，也不会在传送通道产生瓶颈。另一方面，系统集成主要目的是对各子系统综合管理，以及向信息服务系统提供资源，这种数据并不是各种无序信息的集合，而是将这些数据处理后以标准的格式提供给整个网络的应用系统，例如建立开放的网络公共数据库。

大厦的集成管理系统采用快速以太网作为基本的支持网络，支持 100Mbit/s 的传输速率。系统可以通过网桥或路由器和其他局域网、广域网连接。系统中以 TCP/IP 或者通信网关实现和各子系统的通信连接，采集各类机电设备的实时参数，然后通过实时对象服务程序把它们转变为统一的数据格式向网络上发布。设计弱电系统集成中的计算机网络系统时，可对网络与弱电各子系统的通信接口进行二次开发，实现系统对各子系统的通信，将大厦内的所有设备监控子系统集成为一个综合的系统，集中在中央监控室的计算机或者是网络上的个人计算机上进行全面的监控管理。在此基础上，建立大厦综合管理和信息服务系统。只有建立了弱电系统集成计算机网络系统，才有可能按照大厦物业管理的需要，进行深入的软件开发，形成大厦综合管理自动化系统。这个系统不仅是要对整个大厦内所有设备资源和运行状态进行监测、记录和管理，而且要对大厦内的各种公共服务设施、通信系统、办公自动化系统等进行综合集成管理，即构成一个集成智能大厦的自动化管理系统。

5. 集成系统的工作站屏幕显示

弱电系统集成系统（BMS）将集成的弱电系统数据显示于工作站屏幕上，并可分成几种类型显示。

各子系统显示；集成显示，根据大楼的平面布局在一张平面图上显示多个系统的设备状况。显示软件支持 BMP、WMF、GIF 和 EMF 图形格式，可将 AUTOCAD 图形直接转换到集成系统中去，也可以通过其他绘图软件制作相应的图形，或直接利用子系统的图库。显示软件支持 AVI 动画，可从摄像机或 VCD 中剪辑动画插入监控平面。软件提供用户自行编辑若干动作的动画，以使图形生动。显示软件也支持如风机转动、水泵转动、水位及温度高低等动态和模拟量显示。软件还支持 WAV 声音文件，在操作过程中产生多媒体效果。软件提供监视对象的变化趋势图。

6. 系统的安全登录保障机制

系统集成中对所有物理、逻辑对象都可以安排在预设定的不同对象组中，每个对象组都可以进行特定的授权并使用相应的用户个人密码。只有被授权的用户才能对预设定的对象组进行操作和处理。

操作管理员级密码可作为二级密码，以此密码进入系统，只能作一般的操作、浏览和处理，进行有限的界面控制。程序员级密码，以此密码进入系统，可作全面的操作、浏览和处理，进行操作界面的修改和控制，并且能够进行对象组的设置、修改和用户个人密码的授权。

11.7 智能楼宇系统集成的部分问题探讨

开放、兼容、灵活、获得广泛支持并且专门针对智能建筑的通信协议或现场总线已经成为智

能建筑领域的一个发展方向。而 BACnet 协议正是这样一种具有开拓性的技术，并能使不同厂商的设备能够互联、互换和互操作，打造无缝连接的 BAS。充分满足了业主、用户和集成商的需求并提供了多种网络互联和接入 Internet 的方案，为智能建筑内部各系统之间的集成提供了便利条件。

智能楼宇系统集成发展的趋向是：智能集成程度越来越高，从而为智能楼宇创造更大的附加值，具体体现在以下方面。

11.7.1　系统集成的一些新特点

1. 系统工程方法的使用

使用系统工程方法进行系统集成设计、开发和进行智能楼宇的系统集成工程施工。

由于智能楼宇从本质上讲，就是一个集纳多种现代科学技术的载体，本身就是一个系统化工程，不仅要用系统工程方法设计、开发，而且要用系统工程方法进行系统集成。

2. 进行系统集成后有更好的开放性

随着技术进步，随着智能建筑系统技术集成内容的增加与发展，系统集成的开放性也继续在发展，使新出现的技术、新的子系统、新的协议及标准可方便地纳入到系统集成中；各种相关通信和管理软件的升级可平滑进行。

3. 互联网技术体系与理念更深入地融入智能建筑的系统集成中去

智能建筑的系统集成将更深入广泛地应用 Internet 的技术体系和理念，如使用具有优良交互性能和开放的浏览器/服务器体系结构；使用性能更为优良的开放性数据库系统等。基于 Internet 的技术体系和理念的信息网络与控制网络的集成技术成模块化结构实现；基于 Intrarnet 网络环境下的集成系统中各子系统之间的数据信息交互能力大大增强并因此使整个智能建筑系统具有更强的综合功能，但同时安全性更高。具体体现为：采用基于 Web 方式统一管理平台和人机界面的浏览器/服务器模式，作为智能建筑集成系统的主导模式。

4. 系统集成中的视频数据流处理技术内容的大幅度增加

随着多媒体技术的发展，随着视频数据流的压缩、传输和处理技术的发展，智能建筑处理和使用多媒体文件和视频文件及信息的水平层次都会达到相当高的程度，在文件、作品的交流、数据信息的交互中，文本形式、静态和动态图片、语音和流媒体视频播放综合应用，尤其是视频数据在文件中的比重越来越大。如随着支持网络的数据传输速率越来越高，远程视频会议、远程可视电话和远程实时图景传输将会有更好的身临其境效果。建筑智能化系统的系统集成的视频数据流处理技术内容将大幅度增加，并成为智能建筑技术水平提高的主要内容之一。

5. 系统集成中融入知识管理系统

为使智能化建筑的综合管理系统具有高效能，就要将知识管理系统融入系统集成中。

11.7.2　使用以太网架构系统的集成技术正在迅速发展

采用 TCP/IP 的以太网对自动化领域各层面产生了很大影响。已经从建筑自动化系统的管理层延伸到了控制层，而且现在正在向现场层延伸。以太网直接代替现场总线可能出现的问题是：采用 CSMA/CD 的信息发送方式，存在“不确定性”问题，无法确定发送测控信息的时间，这就会对实时监控构成影响；另一个是线路利用率低，因为以太网数据帧中，不代表实际数据的字节较大，而自动化领域实际数据很短，效率较低。可以通过提高以太网的传输能力来解决第一个问题，从而适应实时控制的需要。用 UDP/IP 取代 TCP/IP，由于采用了高速以太网，也就解决了第二个问题。随着以太网技术的发展，在楼宇自动化控制领域中有可能出现以太网一网到底、因特网与控制网融为一体的趋向，使楼宇自动化控制的支持网络环境实现简约化。

11.7.3 中间件技术在系统集成中的重大作用

客户机/服务器模式具有很大的优势，但这种模式的大范围应用在一定程度上要借助于中间件技术来实现。编写大量的跨平台、与多种不同协议关联、使用多种编程语言的应用软件是一件难度大且很费时的工作。建筑智能化系统中，操作系统的多样性，繁杂的网络程序设计、管理，复杂多变的网络环境，数据分散处理带来的不一致性，性能和效率、安全等问题，要进行系统集成就要在操作系统之上形成一个可复用的公共部分，供不同的应用软件共享使用。一个有效的办法是在客户机和服务器之间加上一层，即所谓的中间件。中间件提供简单的较高层次的应用软件编程接口（API），把下层网络技术屏蔽起来，使程序员把精力集中在应用方面，而不是在通信问题上，通过中间件把应用与网络屏蔽开。

最基本的中间件技术有通用网关接口（CGI）和应用程序编程接口（API）两种。它能够直接访问或调用外部程序来访问数据库，可以提供与数据库相关的 HTML 页面，或执行用户查询，同时将查询结果格式化成 HTML 页面，并通过 Web 服务器返回给用户浏览器。CGI 允许 Web 服务器运行外部应用程序，通过外部程序来访向数据库资源，以产生 HTML 文档并返回浏览器。

CGI 提供了一种与数据库连接的简单方法。中间件是处于应用软件和系统软件之间的一类软件，是客户方与服务方之间的连接件，它以自己的复杂换取了用户应用的简单。中间件是基于分布式处理的软件，能解决网络分布计算环境中多种异构数据资源的互联共享问题，实现多种应用软件的协同工作。异构的硬件设备可通过适配器来连接，异构的软件系统可通过中间件来连接形成公共平台。在智能建筑系统集成朝着模块化、简约化方向发展的同时，中间件技术所起的作用越来越大这种趋势是非常清晰的。

第 12 章　BACnet 网关以及 BACnet 网络与异构网的互联

12.1　BACnet 网络的互操作域

BACnet 标准采用面向对象的方法，把参与通信的各类设备抽象为标准“对象（Object）”，并用“属性（Property）”来说明对象的内容，定义“方法（Method）”或“服务（Service）”作为对象访问的基本手段。在 BAS 中，BACnet 标准规定设备检测与控制信息均以消息的形式在通信网络中传递；并借用了一组成熟的局域网标准作为 BACnet 的底层通信工具。

12.1.1　描述设备的通用方式和分层级的体系结构

1. 描述设备的通用方式

BACnet 标准提供了描述设备的通用化方法：为每一类设备预先定义一组对象，并辅以一个标准属性集。任何一个对象都可以描述为由不同属性值所表示的可访问信息集合。例如，一个数字输入量在 BACnet 中被定义为数字输入对象，其当前值、对象名称、设备类型等信息即构成该对象的一个标准属性集。每个标准对象至少应包含 3 个基本属性（对象标识、对象名称、对象类型），每个属性都赋予了特定的含义。

2. 层次化的体系结构

为了提高网络的通信效率和降低构建网络实现通信的软硬件资源，BACnet 采用了楼宇自控网络的简化体系结构。BACnet 协议栈应用层整合了 OSI-RM 的上面 4 层协议，实现了 BAS 中的通信处理和设备的互操作功能；网络层定义了 BACnet 标准的高效路由和网络拥塞控制机制；链路层则采用 ISO 8802-2 定义的 LLC 协议规程，并将其作为链路层与网络层之间的基准协议；物理层则直接引用了 5 种已得到广泛应用的标准局域网协议。

12.1.2　BACnet 的互操作模型

BACnet 标准的推出在一定程度上是为了实现控制网络中的各类对象和设备之间的互联互通，以及互通信和互操作。要实现互操作必须在互通信的基础上进行。

互操作是设备之间进行互通信基础上的动态交互，实现互操作主要有直接模式和间接模式。直接模式也称“命令模式”，采用“命令”方式对实体进行操作；间接模式采用“读—写（Read—Write）”方式对被操作对象的属性进行访问，也称“读写模式”。对象模型是 BACnet 互操作的理论基础，抽象化的对象描述方法是实现互操作的技术关键，根据互操作功能的表现形式不同，可以建立不同类型的互操作模型。

1. R/W 模型

间接访问模式是一种较为复杂的对互操作过程的描述，该模式使用 BACnet 对象模型把被操作的实体抽象为“对象”，用这种方式屏蔽被操作实体的结构、配置，通过“读—写”对象的属性间接地实现对被操作实体的控制与管理，即 BACnet 协议以读写访问的方式，实现了对物理设备的互操作。这种基于 BACnet 对象模型对物理设备实现统一操作的机制，被称为 R/W 模型。

R/W 模型采用读写的方式来操作数据，使用“读取一个数据项的值”和“写入一个数据项的值”这两条基本的命令或两条原语就可以实现几乎所有的操作。在这种模式中，不增加原语

的数量，其服务原语在内容和条目上相对固定，能够保持协议的完整性和稳定性。BACnet 协议还定义了有限数目的高级操作命令，将这些高级操作命令视为基本“读”、“写”命令或服务原语的派生命令，用以增加灵活性。

2. BIBB 模型

BACnet 标准根据“ASHRAE 13 DDC 系统说明和设计指南”定义了 5 个互操作域，也就是数据共享（Data Sharing）域、报警与事件管理（Alarm and EventManagement）域、时间安排（Scheduling）域、趋势（Trending）域和设备与网络管理（Device and Network Management）域，每个互操作域由多个 BIBB（BACnet Interoperabi1ity Building Block 互操作功能构造块）组成，见表 12-1。

表 12-1　不同 BACnet 标准化设备必须具备的 BIBB 表

	B-OWS	B-BC	B-AAC	B-ASC	B-SA	B-SS
数据共享	DS-RP-A、B	DS-RP-A、B	DS-RP-B	DS-RP-B	DS-RP-B	DS-RP-B
	DS-RPM-A	DS-RPM-A、B	DS-RPM-B	DS-WP-B	DS-WP-B	
	DS-WP-A	DS-WP-A、B	DS-WP-B			
	DS-WPM-A	DS-WPM-B	DS-WPM-B			
		DS-COVU-A、B				
报警与事件管理	AE-N-A	AE-N-I-B	AE-N-I-B			
	AE-ACK-A	AE-ACK-B	AE-ACK-B			
	AE-INFO-A	AE-INFO-B	AE-INFO-B			
	AE-ESUM-A	AE-ESUM-B				
时间安排	SCHED-A	SCHED-E-B	SCHED-I-B			
趋势	T-VMT-A	T-VMT-I-B				
	T-ATR-A	T-ATR-B				
设备与网络管理	DM-DDB-A、B	DM-DDB-A、B	DM-DDB-B	DM-DDB-B		
	DM-DOB-A、B	DM-DOB-A、B	DM-DOB-B	DM-DOB-B		
	DM-DCC-A	DM-DCC-B	DM-DCC-B	DM-DCC-B		
	DM-TS-A	DM-TS-B 或 DM-UTC-B	DM-TS-B 或 DM-UTC-B			
	DM-UTC-A					
	DM-RD-A	DM-RD-B	DM-RD-B			
	DM-BR-A	DM-BR-B				
	NM-CE-A	NM-CE-A				

BIBB 是一种 BACnet 应用服务或多种 BACnet 应用服务的集合。为了便于选择设备，匹配两设备的互操作性，BIBB 分别用设备 A 和设备 B 来定义服务。一般情况下，设备 A 表示服务的请求方，设备 B 表示服务的响应方。

BIBB 是对 BACnet 互操作功能进行分解和抽象所形成的基本单元，BACnet 定义 BIBB 模块的目标是为设计者提供一种集成化的互操作描述方法，而设计者无需理解相关技术细节或具体的实现细节，因此可以把 BIBB 理解为“BACnet 互操作功能构造块”。其主要作用是简化网络控制系统的应用需求描述，以便以最小的代价来满足设备互操作的功能需求。

根据 BIBB 的定义及分类，不同 BIBB 为 BACnet 提供了不同的服务。BACnet 的任何一种互操作都隶属于以上 5 个互操作域中的某一个。对于复杂的互操作功能描述，可以通过多个 BIBB 组合来表示。这种通过基本单元组合描述复杂过程的方法，是 BACnet 标准常用和很有效的一种描述方法。

3. 集成化的 BIBB 模型

使用 BIBB 描述互操作过程是一种标准的 BACnet 方法，但由于使用到的 BIBB 模块数量较多，用户直接选择数量合适、用途合适的 BIBB 模块来描述和说明互操作功能难度较大。因此对 BIBB 模块进行了一定程度的集成，定义出了 6 类标准设备，见表 12-2。

表 12-2　BACnet 标准设备类型表

BACnet 标准设备类型：
□BACnet 工作站(B-OWS)
□BACnet 楼宇控制器(B-BC)
□BACnet 高级应用控制器(B-AAC)
□BACnet 专用控制器(B-ASC)
□BACnet 智慧型传感器(B-SS)
□BACnet 智慧型执行器(B-SA)

B-OWS 是操作员控制和管理 BACnet 系统和设备的窗口。B-OWS 在层级结构的 BAS 自控网络系统一般不作为 DDC 对现场设备进行控制，其作用是监视和管理 BACnet 系统及其设备。B-OWS 实现的互操作域及互操作域的互操作功能项有：数据共享；报警与事件管理；时间安排；趋势与日志；设备与网络管理。

BACnet 楼宇控制器（B-BC）是一种通用现场可编程序控制器，可以用于各种 BAS。B-BC 实现的互操作域及互操作域的互操作功能项有：数据共享；报警与事件管理；时间安排；趋势与日志；设备与网络管理。

BACnet 高级应用控制器（B-AAC）是与应用有关的高级控制器，有一定的可编程序能力，但配置资源较少，功能不如 B-BC。B-AAC 实现的互操作域及互操作域的互操作功能项如下：数据共享；报警与事件管理；时间安排；趋势与日志；设备与网络管理。

BACnet 专用控制器（B-ASC）是用于特定目的的控制器，虽然具有一定的可编程序能力，但资源配置更少，还不及 B-AAC。B-ASC 实现的互操作域及互操作域的互操作功能项尽管在形式上与上述控制器相同，但具体的功能要弱化许多。

BACnet 智能执行器（B-SA）是功能极为有限的简单控制器。网络控制系统并具有了相应的互操作功能。

12.2　BACnet 网关

12.2.1　BACnet 网关的主要作用

BACnet 网关主要用于连接 BACnet 网络与非 BACnet 网络，是 BACnet 应用系统中重要的设备，网关设备通常被称为协议转换器，它可以将两种不同的通信协议或标准进行双向翻译，两个使用不同通信协议的通信网络和异构系统通过网关互联，可以实现互联互通。当 BACnet 网络需要与非 BACnet 网络互联时，需要设置网关设备进行连接。BACnet 网关具体地应用于不同的场所功能不同，实现的成本也不同，即在不同的应用中具有不同的互操作域及其功能项。这就导致

BACnet 网关设备不能用固定的互操作域及互操作功能项进行标准化，因此 BACnet 标准没有将 BACnet 网关定义为标准类设备。

尽管 BACnet 网关不是标准类型的 BACnet 设备，没有在标准中进行正式定义，但还是在美国 GSA（公用设施管理局）制定的“BACnet 互操作楼宇自控网络系统说明和设计指南”NISTIR 6392 中进行了具有指导性的定义。

BACnet 网关如果实现的是两个控制网络的互联，每个控制网络都对应着一个控制域，换言之，BACnet 网关实现了两个异构的控制域的互联，这种互联不是无缝的互联。

12.2.2　一种支持 BACnet 总线的无线传感器网关

德国一家公司不仅生产传统的接线式传感器，同时也生产带有 LON、BACnet 等总线通信功能的智能传感器。还推出了较新的系列化的无线无源传感器，可充分利用自然的光能、人体运动的能量来支持其工作。为了较好地适应现代建筑信息化、智能化的需求，该公司将无源无线传感器融入具有 BACnet 协议支持的智能楼宇控制系统中，结合推出的无线传感器网关，就可以实现将无线传感器产品接入 BACnet 系统。可以实现接入 BACnet 系统的无线传感器网关如图 12-1 所示。



图 12-1　一种实现接入 BACnet 系统的无线传感器网关

该网关的技术参数：

1）接口：RS-485 接口，支持 BACnet 协议；

2）防护等级：IP42；

3）附件：外置天线。

12.2.3　LonWorks 网络与 BACnet 网关

1. LonWorks 与 BACnet 的各自应用领域

LonWorks 技术与应用系统的优势在于：在现场实时控制领域，为 BAS 中的传感器和执行器网络化监控提供了一个高效能的控制域通信网络来实现互操作。LonWorks 适合于智能楼宇中照明系统、HVAC 系统、电力供应系统、安防系统和消防系统之间的通信和互操作应用，并且是一种比较经济的技术方法。BACnet 主要运用于多个供应商之间不同系统的集成，是信息管理领域方面为实现不同的系统互联而制定的标准。和 LonWorks 技术相比，BACnet 标准更适合处理大系统的大数据量通信，组织处理更复杂的过程，不同厂家的关键组件可以很方便地融入一个大型智能建筑系统中。如果用户希望在同一个中央监控主机的操作平台界面上进行对整个系统的操作管理，那么 BACnet 应用系统是较理想的选择。

但 LonWorks 控制总线与 BACnet 标准支持的其他几种控制网络彼此之间还是异构网络，因此 LonWorks 控制总线与这些异构网络的数据通信还要使用网关装置。

2. LonWorks 网络与 BACnet 网关硬件

由于 BAS 设备一般都配备了与第三方设备进行连接的专用模块接口。这些接口大都采用 RS-232 或 RS-485 方式，从而可以使用 BACnet 的点到点（PTP）通信规范。由于 BACnet 的 PTP 通信规范比较简单，这就为设计网关的硬件线路和应用程序提供了方便。

网关装置采用了神经元芯片为硬件核心，并用它来设计串行接口电路，以实现与 BACnet 设备层网络的连接。Neuron C 语言则被用来构筑 BACnet 的设备对象。LonTalk 协议的标准变量或显式消息传递方式用来实现 LonWorks 网络内部的数据通信，应用程序将 LON 子系统采集的节点数据映射到一个含有多属性的独立 BACnet 设备对象。网关结构组成如图 12-2 所示。

网关装置的通信接口如下：

接入 BACnet 网络通信接口：通用异步收发器（UART）硬件连接 BACnet 第三方模块的 RS-232 接口。

接入 LonWorks 网络的通信接口：通过 FTT-10A 收发器连接 LonWorks 网络。

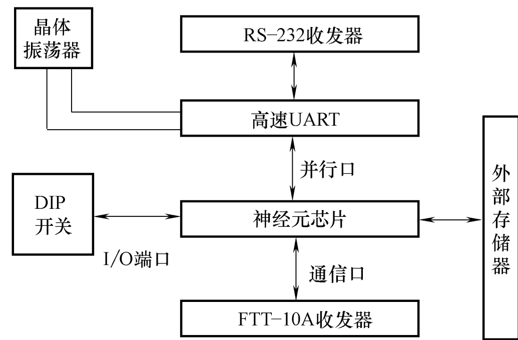


图 12-2　网关结构组成

神经元芯片内部的固件包含了低层次的处理机制，网关的应用程序不需要处理介质访问控制、冲突避免算法和优先权处理等复杂任务，只是运行和处理各种协议服务，因此使网关应用程序开发简化。网关应用程序中包括一个网络驱动程序模块，用途是实现独立于硬件的网络接口，并用来管理网关与 BACnet 网络的物理接口，提供流量控制，管理 I/O 缓冲区，并且提供对 BACnet 的读写接口。由于网关对于芯片 I/O 对象和程序设计的要求较高，所以选用神经元芯片 CY7C53150L，结合外部扩展存储器 AT29C512、Echelon 公司的双绞线收发器 FTT-10A、EXAR 公司的通用异步收发器芯片 ST16C550 来构造硬件系统。硬件组成如图 12-3 所示。

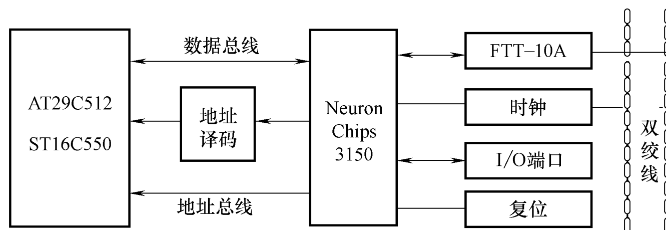


图 12-3　网关的硬件组成

时钟直接外接 10MHz 晶体振荡单元。收发器 FTT-10A 采用单端的直接驱动通信方式，其引脚 RXD 和 TXD 分别与神经元芯片的 CP0 和 CP1 相连，CP2、CP3 不用连接，而 CP4 则与 +5V 电源相连。外部存储器 AT29C512 中的 56KB 作为外部 Flash 存储器，地址空间为 0x0000 ~ 0xDFFF。其中程序存储器使用 0x0000 ~ 0xDFFF 的 32KB，包括 16KB 的 Flash 存储器用来存储神经元芯片的固件；数据存储器使用 0x8000 ~ 0xE77F 的地址空间；而异步通信收发器芯片 ST16C550 则使用 0xE780 ~ 0xE7FF 中的 8 个连续地址。ST16C550 的外接晶体振荡单元为 3.68MHz。

3. 软件模块

LonWorks 系统节点间的通信可以使用网络变量（隐式消息）和显式消息。某一给定网络变量的长度是固定的；而显式消息相比而言很容易有一个变长度的数据成员。由于 BACnet 对象包含了多个属性，数据结构的内容和种类比较多。其长度也经常发生变化，所以选用显示消息的传递方式比较适合。显式消息提供请求/响应机制。可以用来实现远程调用。软件模块中实施步骤有：

1）构造消息：msg-Out；

2）发送消息：msg-send（）、msg-cancel（）；

3）接收消息：msg-receive（）、msg-in、msg-arrives；

4）使用应答服务发送消息：msg-succeed、msg-fail、msg-complete；

5）使用请求/响应服务发送响应：resp-Out、resp-send（）、resp-cancel（）…；

6）显式的分配缓存器。

该网关可以通过显示消息在 LonWorks 网络上与 LON 节点通信。LON 节点和网关将相应的模拟和数字变量转换成符合 BACnet 对象标准的具有多属性的结构。网关本身是一个独立的 BACnet 设备对象，通过采用 PTP 方式的 RS-232 接口与第三方接口模块通信连接。

使用 LON—BACnet RS-232 网关实质上也是实现了 LonWorks 子系统与 BACnet 系统之间互操作，完成了 LonWorks 控制域与一个 BACnet 子控制域的互联。

12.2.4 ModBus 与 BACnet MS/TP 互联的网关主要技术参数

1. 某厂家 ModBus—BACnet MS/TP 网关及技术性能

实现一个 ModBus 现场总线与 BACnet MS/TP 控制总线互联的网关如图 12-4 所示。

该网关的主要技术性能参数如下：

1）通过 BACnet 对象可以读/写任何标准的 ModBus 寄存器。

2）实现从 ModBus RTU 主（Master）到 BACnet MS/TP，BACnet IP 从（Slave）的网关转换。此处注意，该网关还能实现 ModBus 与 BACnet IP 网络的互联。

3）向下提供 1 个 RS-485/ModBus RTU 接口，可连接 255 台 ModBus 从（Slave）设备，速率支持 2400 ~ 38400bit/s，通信距离可达 1000m。

4）向上提供 1 个 RS-485/BACnet MS/TP 接口，速率支持 2400 ~ 38400bit/s，通信距离可达 1000m。

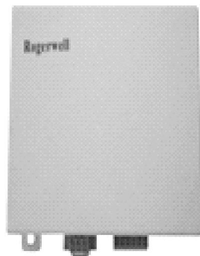


图 12-4　ModBus 与 BACnet MS/TP 互联的网关

5）支持 ModBus 的 coils、holding register、input register、discrete input 这四类标准的寄存器。

6）ModBus 寄存器的映射关系和 ModBus RTU 的波特率等参数通过串口进行配置。

7）ModBus 轮循的时间间隔可以进行配置。

8）采用 32 位 ARM7 设计，内置嵌入式操作系统，运行速度快。

9）产品稳定可靠，采用工业化设计，在恶劣环境下也能正常工作。

10）导轨安装，前面板可拔插式接线端子，安装方便。

2. 网关

该系列的网关装置能完成 RS-232/485，ModBus 到 BACnet MS/TP，BACnet IP 的数据转换，使得具有串口的制冷机组、空调、电梯、传感器、显示器、电动门、除湿机组、报警器能迅速地完成与 BACnet 系统的集成。

网关可拓展的系列情况如下：

1）PC-GATEWAY-MBI ModBus RTU 转 BACnet/IP（实现 ModBus RTU 与 BACnet/IP 网络互联）。

2）PC-GATEWAY-MB ModBus RTU 转 BACnet MS/TP（实现 ModBus RTU 与 BACnet MS/TP 控制总线的互联）。

3）PC-GATEWAY-EBI EIB 转 BACnet/IP（实现欧洲工业总线与 BACnet MS/TP 控制总线的互联）。

4）PC-GATEWAY-MP ModBus RTU 转 PROFIBUS DP（实现 ModBus RTU 与 PROFIBUS DP 控制总线的互联）。

5）PC-GATEWAY-PBI PROFIBUS DP 转 BACnet/IP（实现 PROFIBUS DP 控制总线与 BACnet/IP 网络的互联）。

6）PC-GATEWAY-ML ModBus RTU 转 LonWorks（实现 ModBus RTU 与 LonWorks 控制总线的互联）。

12.3　部分网关产品及性能参数

12.3.1　Rogerwe Ⅱ网关（通信协议转换器 PC-GATEWAY）

Rogerwe Ⅱ网关产品能够解决过程自动化、电力自动化、楼宇 IBMS、企业信息化中由于各软件系统、设备通信协议不一致，造成系统通信连接和数据交换成本加大的困难。PC-GATEWAY 网关服务器的核心软件是一个脱离于具体硬件设备的接口通信服务平台，依据其开放的实时数据库，可以简化系统中异种协议的转换和系统联网过程，异种协议容易接入并可转换为标准协议（如 OPC 方式），并与其他系统联网。

1. PC-GATEWAY 网关服务器主要功能

1）实时数据采集和处理，不但可以实现串口、以太网、现场总线物理层的通信协议转换、同时在数据链路协议层的通信协议也可以相互转换。

2）具备将非标准通信协议转化为标准通信协议的功能，具有开放性的 OPC 接口。

2. 输入方式

物理层支持 RS-232/485、以太网、现场总线，通信软件支持各种通信协议。

3. 输出方式

物理层支持 RS-232/485、以太网，通信软件支持以下各种通信协议；

1）ModBus RTU；

2）ModBus TCP；

3）BACnet IP；

4）BACnet MS/TP；

5）PROFIBUS DP；

6）EIB；

7）LonWorks；

8）CAN；

9）M-BUS；

10）MP-BUS；

11）网络协议 HTTP，FTP，SMTP，SNTP，DHCP，DNS，SNMP，PPP；

12）私有协议。

4. 硬件及网络接口

PC-GATEWAY 通信转换器可以采用通用的硬件平台，通信协议转换软件系统可完成多通信协议的连接、转换和通信数据采集、管理与网络数据共享等强大功能。

（1）设备特点

1）苛刻工业现场考验，防震、抗震；

2）工业电源、无风扇，低功耗设计；

3）丰富的网络通信接口。

（2）设备指标

1）电源：采用工业标准 DC24V 电源；

2）通信接口：具备 RS-232/485；

3）处理器：低功耗、无风扇处理；

4）安装方式：DIN 导轨安装、面板安装、壁挂式安装；

5）扩展接口：良好的扩展接口，串口和以太网接口便于扩展。

12.3.2 EIB 转 BACnet /IP 网关

1. 技术性能特点

1）支持串口、以太网、现场总线等多种通信方式；

2）提供端到端的“协议转发”方案，可灵活扩展通信端口；

3）支持故障容错，工作可靠、配置灵活；

4）支持多转多的协议转换模式、方便不同系统共享数据；

5）支持 OPC 方式数据转换；

6）对于不变公开的保密协议，用户可以利用驱动开发包自行开发采集设备的驱动程序。

2. 输入和输出方式

物理层支持 RS-232/485 控制总线、以太网、部分现场总线。通信软件支持多种通信协议。

3. 支持的通信协议

1）ModBus RTU；

2）ModBus TCP；

3）BACnet IP；

4）BACnet MS/TP；

5）PROFIBUS DP；

6）EIB；

7）LonWorks；

8）LonWorks IP；

9）CAN；

10）M-BUS；

11）还支持 HTTP、FTP、SMTP、DHCP、DNS、SNMP、PPP 等 TCP/IP 协议簇中的部分协议。

12.3.3 ModBus RTU 转 LonWorks 网关

1. 技术性能特点

同前面的 EIB 转 BACnet /IP 网关类同。

2. 输入和输出方式

物理层支持 RS-232/485 控制总线、以太网、部分现场总线。通信软件支持多种通信协议。

3. 支持的通信协议

1）ModBus RTU；

2）ModBus TCP；

3）BACnet IP；

4）BACnet MS/TP；

5）PROFIBUS DP；

6）EIB；

7）LonWorks；

8）LonWorks IP；

9）CAN；

10）M-BUS；

11）还支持 HTTP、FTP、SMTP、DHCP、DNS、SNMP、PPP 等 TCP/IP 协议簇中的部分协议。

12.3.4　ModBus 转 BACnet/IP 网关

一个 ModBus 转 BACnet/IP 网关接在一个 BAS 的管理网络和 ModBus 控制总线之间，将一个由 ModBus 现场总线组织起来的一个监控子系统和 BAS 的中央管理工作站所在的管理网络连接起来。

1. 网关结构

网关结构如图 12-5 所示。

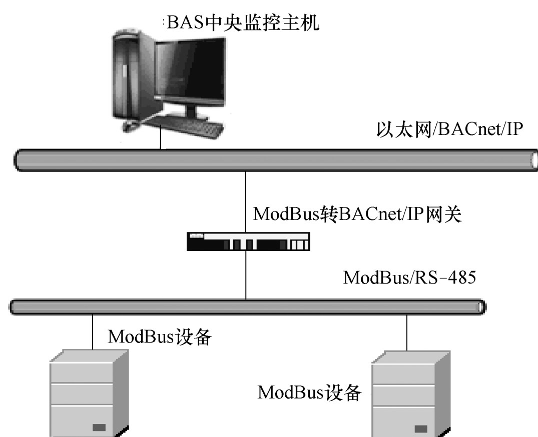


图 12-5　网关结构

系统中接入的网关实现了 ModBus RTU（Master）到 BACnet/IP 网络的互联，该 BACnet 网关向下提供 1 个 RS-485/ModBus RTU 接口，可连接多台 ModBus 从设备，通信速率为 2400～57600bit/s，通信距离可达 1000m。该网关向上提供 1 个以太网 RJ-45 接口，支持 BACnet/IP 标准协议，数据传输速率为 10Mbit/s。

网关内部可采用多种不同的编程语言进行编程，实现算术运算、逻辑与运算、判断循环语句等，网关内部支持报警功能和时间表功能，可内置用户高级策略；支持从 BACnet 到 ModBus 的读写功能；采用 32 为 ARM7 设计，内置嵌入式操作系统，运行速度快；采用工业化设计，在恶劣环境中也能正常工作。

2. 技术性能特点

1）实现从 ModBus RTU 主（Master）到 BACnet/IP 网络的互联。

2）向下提供 1 个 RS-485/ModBus RTU 接口，可连接 32 台 ModBus 从（Slave）设备，支持的数据传输速率为 2400～57600bit/s，通信距离可达 1000m。

3）向上提供 1 个以太网接口，支持 BACnet/IP 标准，传输速率为 10Mbit/s。网关内部支持 300 个网络变量，不限类型。

4）内部软件实现算术运算、逻辑运算和判断循环语句等功能。

5）支持从 BACnet 到 ModBus 的读写功能。

6）采用 32 位 ARM7 设计，内置嵌入式操作系统，运行速度快。

7）可工作于条件较为恶劣的工业生产环境。

12.3.5　ModBus 转 BACnet MS/TP 网关

1. 网关结构

实现从 ModBus RTU 主（Master）到 BACnet MSTP 从（Slave）的网关的装置结构如图 12-6 所示。

2. 技术性能特点

1）实现从 ModBus RTU 主（Master）到 BACnet MS/TP 控制总线的互联。

2）向下提供 1 个 RS-485/ModBus RTU 接口，可连接 32 台 ModBus 从（Slave）设备，支持的

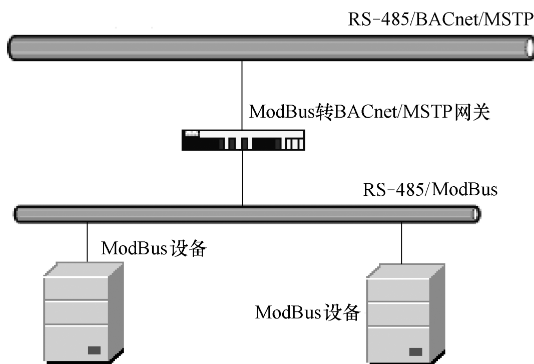


图 12-6 一个网关装置

数据传输速率为 2400 ~ 38400bit/s，通信距离可达 1000m。

3）向上提供 1 个 RS-485/BACnet MS/TP 接口，传输速率为 2400 ~ 38400bit/s，通信距离可达 1000m。

其他性能特点与上述 ModBus 转 BACnet/IP 网关类同。

12.4 BACnet 与蓝牙网络的互联互通

1. BACnet 网络层级结构中的数据流动

一个通信过程必须具备通信实体（或对象)、通信内容（及表示）和通信规程（或方式）这 3 个必不可少的要素。对这 3 个要素，不同的通信协议有不同的定义。BACnet 协议在应用层定义了通信实体和通信内容及其表示方式，通信规程则分别定义在物理层、数据链路层和网络层中，BACnet 标准借用了部分成熟网络技术中的物理层和数据链路层标准。

在简化结构的 BACnet 网络层级模型中，其数据传送方式为，应用程序通过调用 API，将提出服务请求的接收设备标识符和协议控制信息等作为参数传递给 API，然后将通信内容作为数据传递给 API。API 将参数直接下传到网络层或数据链路层，而将数据组成一个应用层服务原语，通过 BACnet 用户元素传递给 BACnet 应用层服务单元，由其产生 APDU；构成网络层服务原语的数据部分通过网络层服务访问点（NSAP）下传到网络层，并通过这种方式下传到各层，最终传输到设备。在 BACnet 网络的拓扑结构中，设备之间只存在一条逻辑通路，无需广域网的最优路由算法；其次，BACnet 具有单一的局部地址空间，因此 BACnet 参照 OSI 模型制定了简化的网络层协议，向应用层提供不确认无连接的数据单元传送服务。每个 BACnet 设备都被一个网络号码和一个 MAC 地址惟一确定。

2. 蓝牙技术及蓝牙标准协议栈

（1）蓝牙技术

蓝牙技术是一种短距微功耗的无线通信技术，该技术能在建筑环境空间中提供高效能的数据传输和无线控制，数据传输速率达 1Mbit/s。但工作距离较近，仅为 10m 左右，这个传输距离的发射功率大约为 1mW，如果将发射功率增大到 100 mW，通信距离可达 100m 左右。使用加强型蓝牙设备，其工作距离可以拓展到几十米，使用蓝牙的通信安全性相对差一些。蓝牙使用 2. 4 ~ 2. 4835GHz 的工业、科研和医疗（ISM）全球通用频段。蓝牙设备的外部无需使用物理线缆进行连接。

推广蓝牙技术的目的之一是取代现有的数字终端，如计算机、传真机等设备上的有线接口。

主要优点是：可以随时随地用无线接口来代替有线电缆连接，可应用于多种通信场合。

从某种意义上讲，蓝牙技术是从 IEEE 802. 11 无线 LAN 技术演化而来，采用扩频技术，工作频段是 2. 4GHz，传输速率为 1Mbit/s，在无线电传输功率是 0dB 时，通信范围约为 10m。蓝牙设备工作在全球通用的 2. 4GHz ISM（工业、科学、医学）频段，理论上，2. 4GHz ISM 频段运行的无线技术可将 30m 内的设备实现可靠连接，传输速率能达到 2Mbit/s，而实际上达不到这一指标。

蓝牙技术独立于不同的操作系统和通信协议，因此应用领域较为广泛。蓝牙力求与不同的操作系统和通信协议有良好的兼容性。蓝牙技术适用于任何数据、图像、声音等短距离通信的场所。

（2）蓝牙标准协议栈和部分层中协议

1）协议栈：蓝牙技术规范是使用无线连接来替代已经广泛使用的有线连接。1999 年 12 月 1 日，“蓝牙”标准的 1. 0b 版发布。标准主要定义的是底层协议，同时为保证同其他协议的兼容性，也定义了一些高层协议和相关接口。“蓝牙”标准的协议栈组成如图 12-7 所示。图 12-7 中的高层协议（又称选用协议）又包括串口通信协议（RF-COMM）、电话控制协议（TCS）、对象交换协议（OB-BX）、控制命令（ATCommand）、VGard、Vcalender、点到点（PPP）协议、因特网相关协议（TCP/IP、UDP）以及 WAP。就其工业实现而言，“蓝牙”标准可以分为硬件和软件两个部分：硬件部分包括射频/无线电协议、基带/链路控制器协议和链路管理器协议。

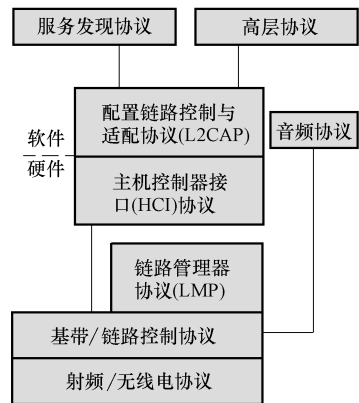


图 12-7　蓝牙标准协议栈

蓝牙作为一种短距离无线连接技术，能够在嵌入蓝牙通信芯片的设备间实现方便快捷、灵活安全、低成本、低功耗的数据和语音通信，是实现无线个域网的主流技术之一。

2）部分协议群：蓝牙协议体系中的协议按 SIG 的标准分为 4 层，包括核心协议层、替代电缆协议层、电话控制协议层和选用协议层。每一层还包含一些具体的协议：

① 核心协议。基带（baseband）、链路管理协议（LMP）、逻辑链路控制与适配协议（L2CAP）、服务发现协议（SDP）。

② RFCOMM 串行线性仿真协议。

基于欧洲电信标准协会 ETSI07. 10 规程的串行线性仿真协议，此协议提供 RS-232 控制和状态信号，如基带上的损坏、CTS 以及数据信号等，为上层业务（如传统的串行线缆应用）提供了传送能力串行电路仿真协议。

③ 选用协议：点到点协议（PPP）、用户数据报/传输控制协议/互联网协议（UDP/TCP/IP）、对象交换协议（OBEX）、无线应用协议（WAP）等。

蓝牙规范协议还定义了主机控制器接口（HCI），它为基带控制器、链路控制器以及访问硬件状态和控制寄存器等提供命令接口。

3. 基于蓝牙技术的局域网接入

用户数据终端在发现一个蓝牙网关后，数据终端经过查询，向蓝牙网关发送服务发现请求，蓝牙网关在其内部的服务发现数据库查询所需要的服务记录，并将查询结果送回数据终端。如果蓝牙网关提供数据终端请求的接入服务，在用户数据终端提出接入局域网的请求后，为该数据终端建立连接，接入并访问局域网。数据终端与蓝牙网关首先建立物理链路，然后执行鉴权等安全性进程，并依次建立 L2CAP、RFCOMM 串行线性仿真协议和 PPP 连接。在建立 PPP 连接后，就可以开始交换 IP 数据分组和局域网的接入访问；当链路断开时，则执行和建立链路相反的进程。

4. 蓝牙与 BACnet 协议转换

（1） 软件结构

在实现蓝牙网络与 BACnet 网络的互联互通接入时，蓝牙网关实现蓝牙与 BACnet 协议之间的相互转换和信息共享，以及同外部通信网络之间的数据交换功能。其软件结构如图 12-8 所示。

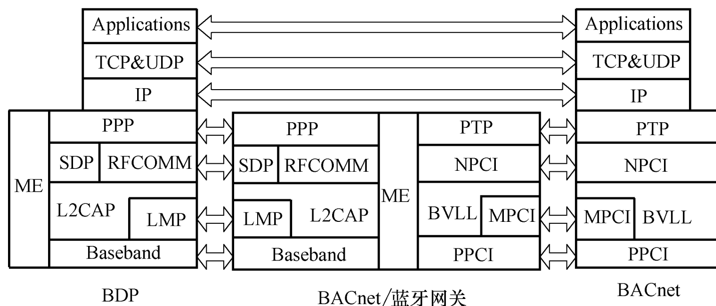


图 12-8　BACnet/蓝牙协议栈

整个软件结构由若干个功能模块组成：蓝牙数据终端（BDT）、蓝牙局域网接入点（BLAP）、管理实体（ME）等。

（2）网关数据处理流程

网关数据处理流程如图 12-9 所示。网关数据处理流程主要包括以下 3 个方面的内容：

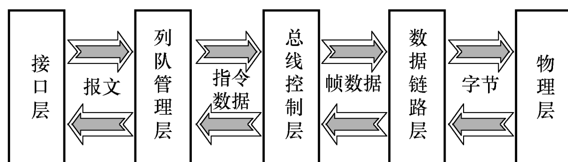


图 12-9　网关数据处理流程

1） 在蓝牙网关中实现蓝牙协议，使蓝牙网关能够与蓝牙微网中的蓝牙设备通信；

2） 在蓝牙网关中实现 BACnet 协议，使蓝牙网关与 BACnet 网络通信；

3） 在蓝牙网关中实现 BACnet/蓝牙协议栈，进而实现 BACnet/蓝牙通信规范，从而完成 BACnet 协议与蓝牙协议之间的转换，而且这种转换是双向进行的。

其中 BACnet 协议栈接口层用来发送和返回协议栈报文；队列管理层接收和发送指令数据；总线控制层接收和发送帧数据；数据链路层接收和发送字节；物理层与外部硬件实现数据流动。

5. 网关硬件

蓝牙网关的硬件结构包括天线单元、2.45GHz 功率放大模块、蓝牙模块、嵌入式微处理器系统和以太网接口，其结构如图 12-10 所示。

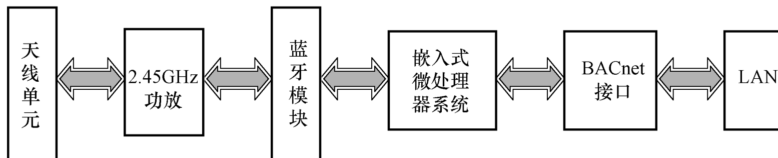


图 12-10　网关硬件组成

微处理器系统是以基于 ARM7 内核的 SAMSUNG 公司的 S3C44BOX 芯片作为硬件开发平台，包括外扩存储器（Flash/SDRAM）、蓝牙模块、液晶显示器、小键盘、以太网接口模块和电话语音控制模块等。蓝牙模块是一款适合短距离无线通信的射频/基带模块，可嵌入任何需要蓝牙功能的设备中。其他的一些子功能模块：无线收发器、基带控制器、闪存、电源管理模块和时钟，可提供高至 HCI（主机控制接口）层的功能。

12.5　关于 BACnet 网关的开发

12.5.1　BACnet 网关

BACnet 网关（BACnet Gateway）是一个把其他工业自动化现场协议转换成 BACnet 标准规范协议的硬件通信设备，或者是软件实现，用一台主机作为转换设备。BACnet 网关在基于 BACnet 协议的 BAS 中，在旧有设备、老旧设备的升级和更新换代中有着不可替代的作用。

通过 BACnet 网关可以将支持其他工业自动化协议的设备连接到 BACnet 网络中，经过 BACnet 的映射融合，成为一个 BACnet 设备节点，支持 BACnet 标准协议的通信规约。BAS 中经常使用的全局性和局部性通信协议有：BACnet、ModBus TCP、ModBus RTU、ModBus ASC Ⅱ、LonWorks、Canopen、OPC，还有各个厂家自有的通信协议，如江森自控的 N2 open 协议、西门子的 PROFIBUS 等。如果开发的 BACnet 网关功能足够强大，可以在一个设备或一套软件中集成所有的楼宇自控网络的协议，然后根据配置文件动态去切换具体映射为哪一种楼宇自控网络规约下的设备。实际上多数厂家在开发网关产品时，为使网关具有较高的性价比，基本上一个设备或一套软件，只提供一对一或一对二的协议网关产品。

要实现将一个协议转换为另一个协议，首先开发者必须拥有两个协议的资源，如两个协议的源代码、开发经验等。这里以 ModBus 到 BACnet 协议转换为例。ModBus 协议是从 PLC 的梯形图演化而来的数值型通信协议。在它的核心源代码和协议规程里，围绕的是不同地址上的数值，数值只分为 COIL 和 Register 两种格式存放。在协议中定义了文件读写。ModBus 协议记录了指针和数值 Value。

BACnet 协议与 ModBus 协议的最大区别是：BACnet 协议不仅仅是关注不同设备的数值，而是更加关注整个受控对象的整体状态，如对于 BACnet 对象的模拟输入，在该对象 Object 中，它会记录对象的名称、类型、ID、当前值、描述信息、状态、单位以及是否可以发送报警信息，还有有关更新间隔的信息等。

将 ModBus 协议转换为 BACnet 协议要比从 BACnet MS/TP 到 BACnet/IP 的转换难度大，原因在于：ModBus 体系中缺少许多 BACnet 对象需要的属性，但有改进的方法。网管生产厂商只要提供一个配置接口，将通过扫描得到的 ModBus 点放到一个大的内存表里，然后再把它映射到用户配置好的 BACnet Object 物件中。

12.5.2　BACnet 网关开发中的程序调试

1. 网络调试程序

在 BACnet/IP 应用系统开发中，开发人员要时刻关注 BACnet 数据包的状态，其中有一些串口监视调试软件是很有用的。

（1）Etheral

在进行网关开发的过程中，在开始进行 TCP/IP 或者 UDP/IP 程序设计之初，可以使用 Etheral 软件，使用较新版本的 Etheral 软件还可以进行 BACnet 数据包的解析。

（2）Wireshark

在进行 BACnet IP 数据包分析和对 BACnet 数据包格式进行解析时，可以使用 Wireshark 软件。在网关开发的初级阶段，使用该软件进行 Ethernet 数据包、BVLL 层数据包、IP 数据包、BACnet NPDU、BACnet APDU 等各层次的数据包的解析层次较为分明。

（3）Sniffer

Sniffer 软件可以用于网络通信数据包的捕捉。

2. 串口调试程序

在 BACnet 网关开发中，为随时关注 BACnet 数据包的状态。需要使用串口监视调试软件。

（1）串口调试助手

串口调试程序用于确认 PC 和设备的串口状态，在 Comportxx 不好区分时，使用该软件就可测试出来。

（2）串口监听软件

串口监听软件可以从驱动层抓取数据包，并可以快速分析通信错误。

（3）Divice Monitoring Studio

该软件也是从驱动层抓取数据包，而且反馈的数据包之间的时间间隔也较为准确，可以用在 BACnet 网关开发的后期，用来调试系统性能。

（4）COMWATCH

该软件在 DOS 操作系统下运行，可以用来分析数据包的时序和后期调试。

3. 数据包仿真软件

（1）VTS

VTS 是 BACnet 开发认证的官方测试软件，有较强的功能。在 BACnet 官方认证阶段，是否符合 BACnet BTL 认证标准，需要提供一个预先在 VTS 中 Pre-Scan 的 PICS 脚本文档，该文档是 BACnet BTL 认证的重要组成部分。

（2）BACbeat

BACbeat 软件可以控制数据包的数据分发方式。

第 13 章　应用系统举例及分析

13.1　BACnet 系统的说明和设计

BACnet135 标准采用“一致性类（Conformation Classes）”和“功能组（Functional Group）”的概念进行 BACnet 系统的说明和设计。一致性类规定了访问对象及其属性的功能类别以及访问的功能权限。

功能组根据 BACnet 对象和应用服务功能不同进行分类，那些能够实现某一特定功能的对象和应用服务被归纳为一个功能组。这里的特定功能是指：对象操作功能、报警与事件功能、文件访问功能以及虚拟终端功能等。BACnet135 标准定义了 13 个功能组。

由于使用一致性类和功能组的概念进行 BACnet 系统的说明和设计有一定难度和较为抽象，为了更好地说明和设计 BACnet 自控网络系统，ASHRAE 的“常设标准方案委员会”——SSPC135 提出了一个新的 BACnet 系统说明和设计方法。该方法基于“BACnet 互操作基本功能块（BACnet Interoperability Building Blocks）”，方法中使用的“BACnet 互操作基本功能块”简称为“BIBB”。

BIBB 是描述楼宇自控功能的 BACnet 服务基本单元。每一个 BIBB 代表一个特定的互操作功能单元，在这个互操作功能单元中包含了一个或多个 BACnet 应用服务。BIBB 单元中，用“A 设备”和“B 设备”表示一组互操作或通信对象，A 设备通常表示互操作功能或通信的请求者或发起者，要求进行互操作数据信息的服务，B 设备表示互操作功能或通信的响应者或执行者，是互操作数据信息的服务器或提供者。使用一个或多个 BIBB 所代表的 BACnet 互操作基本功能块就可以较好地描述 BACnet 系统或设备了。

还有一个楼宇自控领域中普遍使用的标准“ASHRAE Guideline-13，Specifying Direct Digital Control Systems（ASHRAE 13 DDC 系统说明和设计指南）”对 BIBB 进行了分类。ASHRAE 13 DDC 系统说明和设计指南规范了 DDC 系统的体系结构、输入/输出接口的结构、通信、程序配置、系统测试和文档撰写等内容，定义了一种设计及说明 DDC 控制系统的标准化方法。该标准化方法将 DDC 控制系统定义为以下 5 个互操作域（Interoperabilit Areas）：

1）“数据共享（Data Sharing）”互操作域；

2）“报警与事件管理（Alarm and Event Management）”互操作域；

3）“时间安排（Scheduling）”互操作域；

4）“趋势或日志（Trending）”互操作域；

5）“设备与网络管理（Device and Network Management）”互操作域。

对 DDC 控制系统进行说明和描述可以在具体的一个互操作域中进行，意义是：任何一个 BAS DDC 系统或设备的功能属于上述 5 个互操作域中的一个或多个互操作域，这样一来，只要实现了对互操作域及 BIBB 的描述，也就等价地描述了该 DDC 系统或设备的互操作特性。通过所定义的 5 个互操作域和实现各个互操作域的 BIBB，就能较完整和准确地对 BAS 和设备进行说明和设计了。

在实际的工程当中对楼宇自控网络系统进行设计和说明时，多使用“通用设备”的工程型语言，如将 DDC 称为“现场控制器”、“工作站”等、DDC 控制箱叫现场分站等。面对这种常用

的工程性描述，将 BACnet 自控网络系统设备分为 6 个类型的标准设备，并为标准设备定义了互操作域及其 BIBB。BACnet 标准定义的标准设备或通用设备有：

1）BACnet 操作员工作站（BACnet Operator Workstation，B-OWS）；

2）BACnet 楼宇控制器（BACnet Building Conavller，B-BC）；

3）BACnet 高级应用控制器（BACnet Advanced Application Controller，B-AAC）；

4）BACnet 专用控制器（BACnet Applicationspecific Conlroller，B-ASC）；

5）BACnet 智能执行器（BACnet Smart Acamtor，B-SA）；

6）BACnet 智能传感器（BACnet Smart Sensor，B-SS）。

一般地，使用这 6 个标准类型的 BACnet 设备可以构成任意一个 BACnet 自控网络系统，并应用于绝大多数工程项目中。直接利用 BIBB 对 BACnet 系统的设计进行说明还是较困难的，需要对 BACnet 标准有较深的理解。

13.2 应用 BACnet 协议的控制器产品举例

BACnet 开放协议允许来自不同 BACnet 协议制造厂商的系统和产品互相无缝集成。在 BACnet 应用系统中，用户不再被一些私有协议所限制，他们可以自由地选择最好的适用技术来满足特定的需求。

13.2.1 Delta 的 ORCA 系列产品和应用

1. ORCA 系列产品

Delta 的 ORCA（开放实时控制结构）BAS 包括 BAS 的控制器系列产品和中央监控主机的监测控制管理软件 ORCAview，产品体现了 BACnet 的互操作性。中央监控主机的监测控制管理软件也叫操作员工作站软件 ORCAview。ORCAview 操作员工作站软件，将暖通空调、照明和门禁系统集成于一体。

ORCA 系统可根据用户需求制定最佳解决方案，使系统具有较高的灵活性、强大的功能和较高的性价比。使用 Delta 工作站软件可以为用户提供集管理、编程、调试和监控于一体的设备操作和管理，使用图形模块化的编程软件进行控制器控制程序的编写和中央监控主机的操作界面设计编程。

ORCA 系统包括：ORCAview 操作/监控软件；ORCAweb 互联网监控软件；对暖通空调进行控制的系统管理器、系统控制器、应用控制器、网络传感器/温控器；远程扩展模块；门禁管理、门禁控制器；各种回路的照明控制器等。

2. 某国际机场航站楼 BAS

某国际机场航站楼 BAS 系统是应用 BACnet 标准的典型案例，监控点数在 15000 左右，属于大规模的 BAS，使用了近 600 台 Delta 控制器。在主干网中运行多种协议，包括 BACnet Ethernet、BACnet IP 和 HTTP。

该国际机场的建筑面积庞大，受控设备种类多、数量大、分布复杂，BA 系统规模大，楼宇自控网络采用层级结构。BAS 使得机场航站楼严格按照航班计划明确所有空调系统的工作，只要有航班、有旅客，航站楼的设备就要运转；还要考虑到该航站楼 BAS 的日后扩展。

航站楼 BAS 与航班信息、灯光照明进行了系统集成；系统与冷机、锅炉变频器、绿化喷淋系统也进行了设备集成。项目中 Delta 的 ORCA BAS 采用 BACnet 协议成功集成的子系统及设备见表 13-1。

表 13-1　采用 BACnet 协议成功集成的子系统及设备

系统名称	冷源	冷源	电力	冷源	防雨和遮阳
集成品牌	McQuay	york	Liebert	Trane	Somfy
使用的协议及标准	BACnet	proprietary	ModBus	BACnet	Echelon

3. 可以与 ORCA 系统产品实现互操作的系统

所有使用 BACnet 协议的产品都能与 ORCA 系统产品实现互操作，包括 Native BACnet 和 Gateway BACnet 两种。艾顿、奥莱斯等 BACnet 应用系统，以及 York McQuay、Trane 制冷设备通过其 BACnet 接口 ，可以和 ORCA 系统产品实现互操作。

4. 说明

（1） Native BACnet

1） 各层网络上挂接的设备均为 BACnet 设备。

2） 所有 BACnet 设备制造商均可将他们的设备接入网络的任何一个层级并且能够实现正常的通信。

（2） Gateway BACnet

1） 接口通常只支持有限数量的信息点。

2） 网关下挂的设备是由各个不同制造商私有协议支持的。

3） 通过网关（Gateway BACnet）连接两个异构系统，网关下挂的设备实际仍然采用的是私有通信协议，只是通过网关翻译成 BACnet 协议，并非真正的 BACnet 产品，不同厂家的控制器之间很难实现互操作；而 BACnet 产品使用的通信协议就是 BACnet，任何一个厂家的 BACnet 控制设备只要进入网络，便立刻可以识别并协同工作，真正实现了互操作。

13. 2. 2　CornfortPoint 控制器及 BAS 的组织

1. BACnet 设备和 PICS 协议实现一致性声明

BACnet 标准充分考虑到建设设备监控系统所使用的局域网的特征以及建设设备监控系统中的实物对象（设备）的相对固定特性特征，充分利用现有成熟的网络，在底层兼容 6 种网络结构，降低开发成本，同时有利于系统集成。BACnet 标准采用面向对象的技术，定义了一组具有属性的对象来表示任意的楼宇自控设备的功能，使用标准的 BACnet 方式来描述和表示楼宇自控设备。

BACnet 定义了 23 个对象、123 个属性以及 37 项服务，定义了 4 种服务原语来传递相关的服务参数。

为了适应各种不同的应用，并使用系统中的主要设备都能实现互操作，BACnet 标准采用增加选择项的方法。在严格的定义下，对系统的扩展和灵活应用都带来了一定影响，因此 BACnet 标准要求每一个 BACnet 设备必须要编写“一致性说明［PICS（协议实现一致性声明）］”。PICS 是描述实现 BACnet 标准的设备具有哪些 BACnet 特性、功能和选项的文档，用来描述说明系统和系统设计。

2. ComfortPoint 系统

（1） CornfortPoint 控制器系列

作为一种 Native BACnet 控制器（可以在一个全部采用 BACent 通信协议并且不需要网关进行协议转换的系统中使用的控制器称为 Native BACnet 控制器，即 ComfortPoint 控制器），该 ComfortPoint 控制器可以很方便地与任何第三方的 BACnet 系统集成。ComfortPoint 控制器能够作为中央监控主机处理各类楼宇管理应用。包括通常的暖通空调（HVAC）设备监控；能量管理；最佳起

动/停止；最大负荷需求控制；照明控制及许多其他应用。ComfortPoint 控制器依靠“点对点测控网络进行通信，其工作不依赖上级的中央机或应用网络控制器。

ComfortPoint 控制器的组成：

1）XL8000-IPC：基于 IP 的 CPU 控制器，内置 BACnet 路由器，建立 MSTP 与 IP 之间的通信。

2）XL8000-EXPIO：IO 扩展模块，用于增加 XL8000-IPC 的监控点数。

3）XL8000-VAV：基于 BACnet MSTP 单元控制器，内置空气流量传感器，用于 VAV 系统。

4）XL8000-SPC：基于 BACnet MSTP 单元控制器，用于 FCU/AHU 系统。

（2）两种工程应用软件

ComfortPoint 有两个使用 Windows 平台的应用程序，组成 ComfortPoint 控制器的编程调试工具：

1）ComfortPoint Studio：用于定义控制器，并结合了控制算法。

2）ComfortPoint Online：用于在线对控制器进行操作，如上传、下载文件，点的监视或控制，VAV 的标定等。

3. ComfortPoint 系统的 BACnet 特性

ComfortPoint 系统是霍尼韦尔公司较新的基于以太网并使用 BACnet 协议的可自由编程的楼宇自动化控制器系列产品。ComfortPoint 系统控制器及设备完全符合 BACnet 行规的产品分类规定。根据 BACnet 行规定义的 6 种标准类型控制部件和设备，在 ComfortPoint 系统中作为中央站的 EBI 管理平台是 BACnet 工作站（B-OWS），XL8000-IPC 是 BACnet 楼宇控制器 B-BC，而 XL8000-VAV 和 XL8000-SPC 则归类为 BACnet 专用控制器（B-ASC）。

ComfortPoint 系统所有控制器都有专门 PICS 一致性说明文件，从中可以清楚地了解到该控制器的数据链路层特性、实现的互操作模块 BIBB 及所属的 BACnet 行规等一致性声明细节。ComfortPoint 系统控制器内置了 BBMD 功能，从而使信息在 BACnet/IP 网络中的传输更加直接和便捷。

系统的特点和优势如下：

（1）集成功能强

ComfortPoint 控制器可与霍尼韦尔（Enterprise Buildings Integrator，EBI：企业建筑集成平台）中央站无缝集成，两者的紧密结合为用户提供了一套具有较强功能的智能楼宇集成管理系统。

（2）操作便利性

EBI 系统作为操作界面，易于被操作和掌握。

（3）ComfortPoint 控制器采用 32 位处理器

ComfortPoint 控制器适用于从小系统到大规模系统的各类应用。

（4）系统结构简单

使用已有的标准以太网/局域网结构进行 ComfortPoint 控制器、第三方 BACnet 控制器和 BACnet 中央站之间的通信，无需额外的路由器等设备。

（5）开放性好

系统通信基于国际标准 ISO 16484-5 BACnet，确保了与第三方 BACnet 控制器（对等式）和中央站之间的互操作性的实现。

（6）一致性

ComfortPoint 系统各层的控制器均使用 Bacnet 协议，使系统保持良好的一致性。

（7）灵活性

ComfortPoint 控制器是可编程序的，用户应用程序还可以对单元控制器中特定的点进行编程，方便了对各子系统或设备的监控。

（8）点对点通信

在 MSTP RS-485 通道上的控制器支持点对点通信，可以在两个控制器之间建立更为复杂的应用。

（9）远程监控性能优良

可以在任何地方在线操作 ComfortPoint 控制器。利用该 PC 内置的 Web 服务器，即可通过浏览器实现 ComfortPoint 控制器的本地和远程操作。

4. ComfortPoint 系统结构

ComfortPoint 系统结构如图 13-1 所示。系统采用总线型网络拓扑结构，以 EBI 管理系统为中央站，分布在建筑物不同部位的控制分站（ComfortPoint 控制器 IPC）直接由以太网相互连接起来，形成集散控制系统。这些控制域的信息在以太网中的传输速率可高达 10 ~ 100Mbit/s。控制子站（ComfortPoint 控制器 SPC 及 VAV）设置在现场受控设备附近，以 MS/TP 总线与受控设备相连，向上通过 IPC 与中央站相连。控制分站和子站均以 32 位微处理器为核心，实现全部监测及自动控制功能，独立工作，与中央站无关。

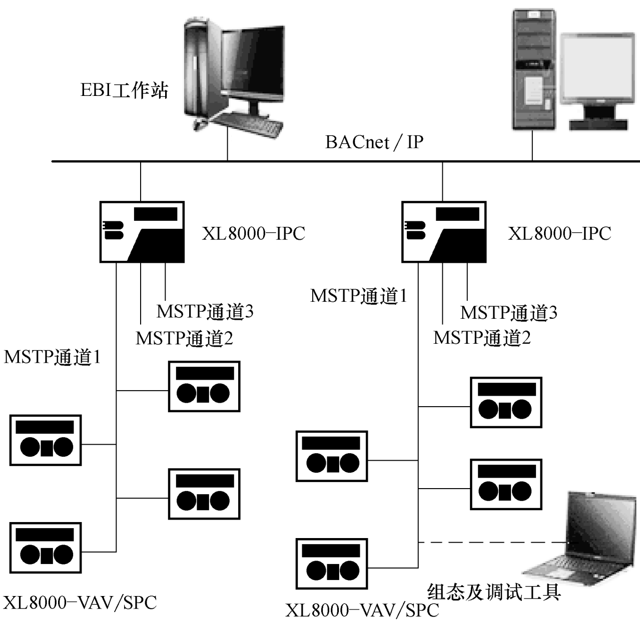


图 13-1　ComfortPoint 系统结构

ComfortPoint 系统采用分布式局域网络构，最上层信息域的以太网管理网络采用总线型拓扑结构，将多个系统管理工作站连接起来，构成局域网，实现共享网络资源以及各工作站间的通信，进而还和其他厂商第三方系统相连。作为中央站的 EBI 管理平台，不仅用于 BACnet 设备集成管理功能，同时更具有建筑设备管理系统、消防报警管理系统、综合安防管理系统等多种系统集成管理的功能。EBI 系统是完全开放的、支持多种通信协议的管理平台，基于以太网的中央站位于信息域，与其他系统管理工作站构成管理层，使用 TCP/IP 协议栈进行通信。

系统的第二层级是 BACnet 楼宇控制器 B-Bc 的 XL8000-IPC，内置了 BACnet 路由器和 TCP/IP 端口，有独立的 I/P 地址，具有由简单到复杂的多种应用。多个 XL8000 到 IPC 连接在控制总线上，同时可连接其他厂商的 BACnet 控制器，以 BACnet-IP 协议进行通信，通信速率可达 10 ~ 100Mbit/s。

第三层为现场层，由 BACnet 专用控制器 XL8000-VAV 和 XL8000-PC（B-ASC）以及多种执行器 B-SA 和传感器 B-ss 等设备组成。现场总线通信协议是 BACnet-MSTP，通信速率为 9.6 ~ 78.6 kbit/s。

ComfortPoint 系统 EBI 中央站实现对整个系统的数据库、图形界面及与其他子系统集成的管理。ComfortPoint 系统控制器与中央站的连接有两种方式，不同的方式决定了控制器中信息流向中央站的传输方式不同。直接接口方式是使用点服务器（Honeywell BACnet Direct Point Server），点服务器先与 ComfortPoint 控制器通信，然后将这些信息传送到 EBI 核心软件进行资料更新，在传送的信息中，仅包括需要在 EBI 监测、编制趋势图等应用的信息。连续扫描方式是使用连续扫描接口，连续不断地将现场的数据保存到 EBI 的数据库中，供 EBI 查看、显示。这些实时数据供中央站随时取用。与这种方式比较，直接接口方式使总线上的通信量大大降低，但连续扫描方式保证了系统更好的实时性能。

在自动控制层，BACnet 标准定义了本层 B-BC 设备的总数量最多 65534 台。因此，ComfortPoint 系统在设计本层的配置时，只需考虑 EBI 数据库的规模限制，而对 XL800O-IPC 控制器的数量实际上没有限制。现场层主要完成风机盘管、VAV 等空调末端设备的控制，ComfortPoint 系统现场层专用控制器的数量由每条 BACnet MS/TP 控制总线驱动能力决定，不超过 30 台。分站 XL8000-IPC 支持 3 条独立的 BACnet-MS/TP 通道，即每台 XL8000-IPC 控制器可支持 90 台专用控制器 XL8000-VAV 和 XL8000-SPC。

13.3 BACnet 标准在冷水机组群控方面的应用

13.3.1 系统组成

某大型建筑中装备的空气调节系统中，将楼宇自控产品与冷水机组机实现 BACnet 通信，并使用电流比作为冷水机组台数的控制依据，同时冷水机组的起/停命令也是通过 BACnet 网关传递到冷水机组进行软启动。

系统中从 DDC 到操作软件都是经过 BACnet 测试实验室认证的 BTL 标志产品。网络控制器提供 BACnet/IP、BACnet/Ethernet、BACnet/MS/TP 网络的通信接口，系统与冷水机组的通信协议通过 BACnet/IP 实现。通过以太网交换机与冷水机组的网关进行星形连接，系统的连接关系如图 13-2 所示。

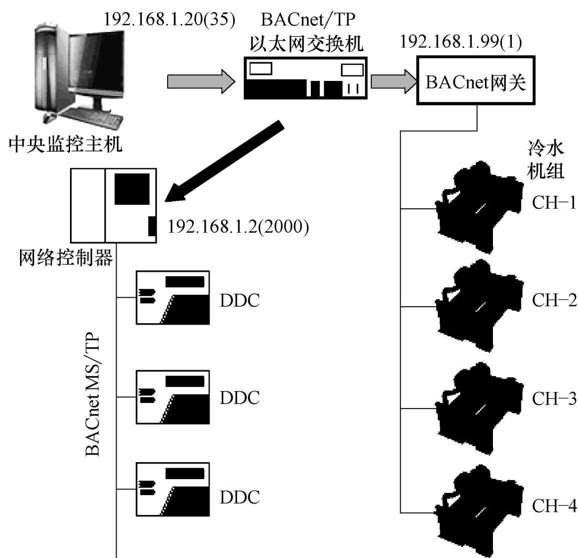


图 13-2 系统的连接关系

13.3.2 地址、设备编号与冷水机组内部参数表

1. 地址与设备编号

由于 BACnet/IP 地址设定对网络通信的正常进行很重要，因此要对 IP 地址和 MAC 地址进行详细规划，避免地址冲突，如网络控制器的 IP 地址是 192.168.1.2，BACnet 地址 2000，中央监控主机的 IP 地址是 192.168.1.20，BAC-

net 地址 35，冷水机组配置的通信网关 IP 地址是 192.168.1.99，BACnet 地址 1。

共有 4 台冷水机组，三用一备构成冷冻站，一号冷水机组编号为 CH-1，其余的冷水机组编号分别为 CH-2、CH-3、CH-4。

2. 冷水机组内部参数表

一号冷水机组内部参数见表 13-2。

表 13-2　冷水机组 CH-1 内部参数表

监控设备	信号种类及信号点数
冷水机组 CH-1 蒸发器出水温度	Analog Input 1
冷水机组 CH-1 蒸发器回水温度	Analog Input 2
冷水机组 CH-1 冷凝器出水温度	Analog Input 3
冷水机组 CH-1 冷凝器回水温度	Analog Input 4
冷水机组 CH-1 压缩机电流比	Analog Input 5
冷水机组 CH-1 蒸发器压力	Analog Input 6
冷水机组 CH-1 冷凝器压力	Analog Input 7
冷水机组 CH-1 蒸发器温度	Analog Input 8
冷水机组 CH-1 冷凝器温度	Analog Input 9
冷水机组 CH-1 油温	Analog Input 10
冷水机组 CH-1 油压	Analog Input 11
冷水机组 CH-1 最大电流比设定	Analog Output 2
冷水机组 CH-1 运行状态	Binary Input 1
冷水机组 CH-1 蒸发器水流开关	Binary Input 2
冷水机组 CH-1 冷凝器水流开关	Binary Input 3
冷水机组 CH-1 起停控制	Binary Output 1

13.3.3　地址和通信接口绑定

在通信及控制应用程序编程中应用的输入点和控制的输出点与 DDC 的相应点通过 BACnet 设置工具进行绑定。以冷水机组 CH-1 为例进行绑定，并自定义编程助记符见表 13-3。

冷水机组的压缩机电流比是冷水机组的重要数据，表示冷水机组的实际出功冷负荷。一般工作在 40% ~100%，小于 40% 机组会喘振，达到或超过 100% 表示机组正在满负荷运行。当多台机组同时运行时，每台机组分担建筑物的总冷负荷，使每台机组的电流比趋于相等。

表 13-3　冷水机组 CH-1 绑定列表

BACnet	类型	地址	描述	RC-Studio 点表	编程助记符
1	Al	1	冷水机组 CH-1 蒸发器出水温度	VAR1	CH1-COLD-SWT
1	Al	2	冷水机组 CH-1 蒸发器回水温度	VAR2	CH1-COLD-RWT
1	Al	3	冷水机组 CH-1 冷凝器出水温度	VAR3	CH1-COOL-SWT
1	Al	4	冷水机组 CH-1 冷凝器回水温度	VAR4	CH1-COOL-RWT
1	Al	5	冷水机组 CH-1 压缩机电流比(RLA)	VAR5	CH1-RLA
1	Bl	1	冷水机组 CH-1 运行状态	VAR6	CH1-S
1	Bl	2	冷水机组 CH-1 蒸发器水流开关	VAR7	CH1-COLD-FS
1	Bl	3	冷水机组 CH-1 冷凝器水流开关	VAR8	CH1-COOL-FS
1	BO	1	冷水机组 CH-1 起/停控制	OUT1	CH1-C

13.3.4　有效的群控方法

冷水机组在空气调节设备中产生的电耗非常大，为节能起见，常使用三种方法控制冷水机组投入运行的台数，冷水机组投入运行的台数控制节能权重很高，通过实施自动控制或优化控制，能够产生很可观的节能效果。

冷水机组台数控制有三种基本方法，其中电流比台数控制方法最精确可靠。原因是拟合多台冷机的出功总冷负荷与用户端的总负荷需求可以达到精确的匹配关系。即通过实时监测多台冷水机组电流比的变化，达到优化负荷出力，及时调整冷水机组运行台数，实现设备运行优化组合，使冷水机组工作在最优工况。冷水机组在运行时的多余冷量从旁通或者平衡管回流，会造成很大的冷量损失，因此仅开启满足冷负荷需求的冷机台数对建筑节能贡献最大。电流比台数控制方法，在 BACnet 之前的实现方法是相当昂贵的，需要楼宇自控厂商与冷水机组厂商私下达成协议，各自研发能连接对方系统的专用网关设备。过去，研发了大量的专用网关设备，耗费了大量的资源。以 10 家楼宇自控厂商和 10 家冷水机组厂商互联计算，总共需要研发 200 个网关设备。当 BACnet 成为 ISO 国际标准以来，情况得到了很大的改善，楼宇自控厂商与冷水机组厂商只需要各自研发自己的 BACnet 网关设备，这样 10 家楼宇自控厂商和 10 家冷水机组厂商互联，总共需要研发 20 个网关设备，互联成本大大降低。另外，通过 BACnet 读取冷机内部蒸发器的出水温度、蒸发器和冷凝器的水流开关，也是控制逻辑的重要参数。通过 BACnet 互联得到的数值与机组内部设定值相同，控制逻辑与机组内部控制逻辑一致，相比管道安装的传感器，可能产生偏差外，DDC 对冷水机组的起/停控制命令通过 BACnet 网关送达冷水机组，中间经过冷水机组的内部安全监测。这种软起动起停控制方法比较安全，比 DDC 控制冷水机组的起/停硬触点要安全得多。

13.4　BACnet 应用系统中的无线传感器网络

13.4.1　无线传感器网络

无线传感器网络是一种具有低速率、低功耗、短距离的无线网络。越来越多的 BAS 中引入了无线传感器网络技术。由于无线传感器网络是物联网的核心技术，无线传感器网络融入 BAS，可以提高 BAS 的性能，可以实现各种传感器以及执行器在各种类型和用途的建筑物内高密度有效分布，实施精细的监测和控制。

1. 无线传感器网络

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks，WSN）是由多个节点组成的面向任务的无线自组织网络。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等，通过各类微型传感器对目标信息进行实时监测，由嵌入式计算模块对信息进行处理，并通过无线通信网络或其他形式的传输网络将信息传送至远端监控中心。

无线传感器网络由 4 个基本部分组成：无线传感器节点、网关节点（sink 节点）、传输网络和远程监控中心，其组成结构如图 13-3 所示。

无线传感器网络的微型传感器具有感知、计算和通信能力。无线传感器网络由一组微型传感器通过 Ad Hoc 方式组成，网络中的传感器可以协作地感知、采集和处理被监控区域的感知对象的信息及数据，发布给使用一定形式终端设备的用户。无线传感器网络属于 Ad Hoc 网络，“Ad Hoc”在拉丁语中的意思是“专用的、特定的”，Ad Hoc 网络通常也被称为“无固定设施的网络”或“自组织网络”，Ad Hoc 网络能够快速、灵活和方便地自动组网。

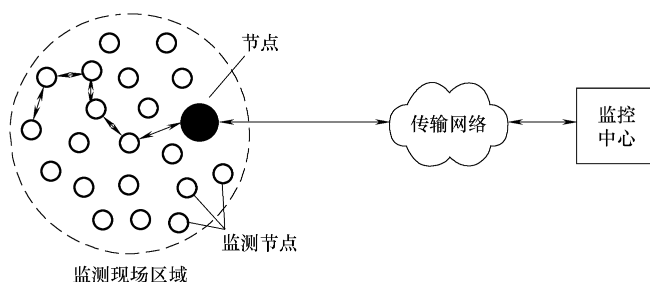


图 13-3　无线传感器网络的基本组成结构

无线传感器节点分布在需要监测的区域，监测特定的信息、物理参量等；网关节点将监测现场中的许多传感器节点获得的被监测量数据收集汇聚后，通过传输网络传送到远端的监控中心。

传输网络为传感器之间、传感器与监控中心之间提供通畅的通信，用于在传感器与监控终端之间建立通信路径。

无线传感器网络中的部分节点可以移动，甚至网络中的全部节点都可以移动，但网络节点发生较大范围内的移动，势必会使网络拓扑结构也会随着节点的移动而不断地动态变化。节点间以 Ad Hoc 的自组网方式进行通信，网络中每个节点都可以充当路由器的作用：本身能够对现场环境进行特定物理量的监测，还能够接收从其他方向传感器送来的监测信息数据并通过一定的路由选择算法和规则将信息数据转发给下一个接力节点。网络中每个节点还具备动态搜索、定位和恢复连接的能力。

微型传感器主要由感知单元、传输单元、存储单元和电源组成，完成对感知对象的信息采集、存储和简单的计算后，通过传输网络传送给远端的监控中心。

用户和接收终端可以主动地查询或收集无线传感器网络的感知信息，也可以被动地接收无线传感器网络发布的信息，并对感知信息进行观察、分析、挖掘、制定决策或对感知对象采取相应的行动。

无线传感器网络的感知对象具体地表现为被监控对象的物理量信息，如温度、湿度、速度和有害气体的含量等。

“ZigBee”一词由“Zig”和“Bee”两部分组成，“Zig”取自英文单词“zigzag”，词义是：“之字形的线条、道路”，“Bee”在英文中是蜜蜂，所以“ZigBee”的合成意义是沿着“之”字形路线起舞的蜜蜂。“ZigBee”较形象地描述了无线传感器网络中的传感器节点在传送数据时依循的路径形同蜜蜂起舞，实际上，“ZigBee”与蓝牙类似，是一种新兴的短距离无线通信技术。

2. ZigBee 网络与 IEEE 802.15.4 标准

因为蓝牙技术的出现，价格低廉、短距离低传输速率、低功耗的无线网络就出现在社会生活当中了。蓝牙的出现，曾让工业控制、家用自动控制和很多领域的制造商欢欣不已，但由于蓝牙芯片的售价一直居高不下，严重影响了这些厂商的使用意愿。后来许多制造商都参加了 IEEE 802.15.4 小组，负责制定 ZigBee 的物理层和媒体接入控制层的通信协议及规范。IEEE 802.15.4 规范是一种经济、高效、低数据传输速率（<250kbit/s）、工作在 2.4GHz 和 868MHz/915MHz 上的无线技术，用于个人区域网和对等网状网络。它是 ZigBee 应用层和网络层协议的基础。ZigBee 是一种新兴的近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的无线网络技术，主要用于近距离无线连接。它依据 IEEE 802.15.4 标准，在很多个无线传感器之间相互协调实现通信。这些传感器只需要很少的能量，以接力的方式通过无线传递数据的方式将数据从一个传感器传到另一个传感器，所以它们的通信效率很高。

13.4.2　ZigBee 网络与 BACnet 的互联

1. BACnet/ZigBee 体系结构

ZigBee 与 BACnet 的互联，等同于在 BACnet 协议栈的数据链路层和物理层又加载了一个 ZigBee 网络，形成一个扩展的 BACnet 的协议体系结构，也叫 BACnet/ZigBee 体系结构，如图 13-4 所示。

ZigBee 网络分为 3 层加入到 BACnet 网络中，其中的 BZLL（BACnet ZigBee Data Link Layer，虚拟数据链路层）位于 BACnet 网络层和 ZigBee 协议栈之间，为 ZigBee 和 BACnet 的互联提供了一个协议接口。

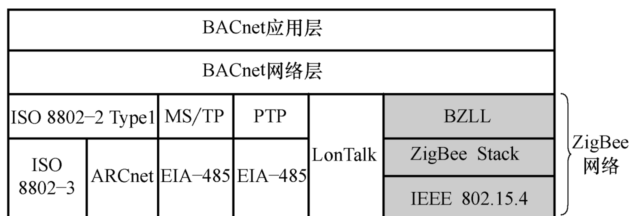


图 13-4　BACnet/ZigBee 体系结构

2. BACnet/ZigBee 网络

有些学者将采用图 13-4 所示体系结构的 BACnet 网络称为 BACnet/ZigBee 网络。每个 BACnet/ZigBee 网络都属于 ZigBee 网络中的一个 ZigBee 组，由 ZigBee 网络上的一组 BACnet/ZigBee 节点组成，存在惟一的 ZigBee 组地址，用 ZigBee 组 ID 进行标志。

为了与 ZigBee 协议兼容，BACnet/ZigBee 网络也引入了簇（Cluster）的概念。在 ZigBee 的覆盖区域，传感器节点将采集到的数据通过接力传递，传送给网关节点，最后再由网关节点传送给远端的监控中心。传感器节点在监测区域的数据传递使用分层的路由算法很普遍，分层的路由算法就是分簇的算法，为便于 BACnet 数据和 ZigBee 数据的转换，隧道方式也起着网关的作用。ZigBee 常用隧道簇是一种包含了可利用隧道机制传输非 ZigBee 数据的通用属性的簇，常用隧道簇和 BACnet 协议隧道簇确定一个 BACnet ZigBee 节点，该节点具有传输 BACnet NPDU（BACnet 网络层协议数据单元）报文的能力。

3. 虚拟数据链路层（BZLL）

对 BACnet 网络通信系统的底层通信系统进行的扩展，必须要考虑与 BACnet 网络层接口的兼容，即在 BACnet 网络层和 ZigBee 协议之间定义了一个微协议层。该协议层相当于 Windows 网络编程中的 API，在此处也相当于 BACnet 的链路层。

当 BACnet/ZigBee 节点接收到一个组播报文时，该节点通过查找组表得到对应的 BACnet 端口，再将报文通过该端口传输到 BZLL 处理。当该节点发送一个广播报文时，BZLL 将报文通过 BACnet 协议隧道簇传输到 ZigBee 协议栈，然后在绑定表中查找到对应的组 ID，通过无线信道发送到该 ZigBee 组上。

在 BACnet 网络中，如果采用 PTP、ARCNet、MS/TP 和 Ethernet 网络做自控网络，当这些局域网的 MAC 地址超过 6B 时，要使用 BACnet 虚拟 MAC（VMAC）地址。

BZLL 使用 APSDE-DATA 服务原语实现对 BACNet NPDU 的传输。APSDE 为 ZigBee 网络层和 ZigBee 应用层设备对象提供了一系列数据服务，并通过 APSDE-DATA 的请求、证实和指示 3 类服务原语实现。这些服务原语在 ZigBee 协议规范中有详细的定义。

13.4.3　ZigBee 网络在 BACnet 系统中的扩展应用

ZigBee 联盟对 ZigBee 网络层协议和 API 进行了标准化，完整的 ZigBee 协议栈是应用层、网络层、数据链路层和物理层规范子集的集合。IEEE 802.15.4 负责物理层和链路层标准，ZigBee 技术的较低数据传输速率和通信范围较小的特点决定了 ZigBee 技术适合于承载数据流量较小的

业务。

1. ZigBee 与 BACnet 集成方法

将 ZigBee 无线网络技术进入 BACnet 集成系统中，可以基于 OSI 应用层协议栈，将现有的 BACnet 设备集成到 ZigBee 系统架构中，也可以在现有的 BACnet 系统架构中，加入 ZigBee 应用系统构成集成体系。将 BACnet 协议数据报文封装为 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准的用报文实现 BACnet 网络与 ZigBee 的互通信，没有进行协议转换。

在 BACnet 系统架构中扩展 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准的集成实现方案的 BACnet 路由/数据链路层协议栈，开发相应的 ZigBee 无线模块。对于应用于 BACnet 系统中的 ZigBee 无线模块，BACnet 网络在应用 ZigBee 无线模块发送信息时，其功能是将收到的信息通过 BACnet 路由/数据链路层协议栈处理后，再应用 ZigBee 协议栈封装为 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准；在应用 ZigBee 无线模块接收 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准的信息时，通过 ZigBee 协议栈将封装为 ZigBee/ IEEE 802.15.4 标准的数据包拆分还原为 BACnet 协议数据报文。该方案的实现实质是使用了前面讲过的隧道技术。

2. ZigBee/BACnet 无线通信模块

ZigBee/BACnet 无线模块采用 BACnet 路由/数据链路层协议栈处理 BACnet 协议包。BACnet 协议栈不受芯片封装限制，因此，结合有关 BACnet 路由/数据链路层协议栈和 ZigBee 协议栈，ZigBee/BACnet 无线模块可独立选用任意芯片处理器进行开发。

3. ZigBee 在 BACnet BAS 中的扩展应用

将 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准无线控制网络技术集成到采用 BACnet 开放标准通信协议的 DDC 以及楼宇自控开放系统中去，BACnet 系统架构和应用的基础上，通过增加 ZigBee 无线模块使 BACnet 系统中具有 ZigBee 无线通信功能，实现 ZigBee 与 BACnet 系统的无缝集成。

4. ZigBee 在 TAC Andover Continuum BAS 中的扩展应用

TAC Andover Continuum 是基于 BACnet 开放标准的 BAS 与安防集成系统，该系统兼容 ZigBee 应用系统。系统架构如图 13-5 所示。

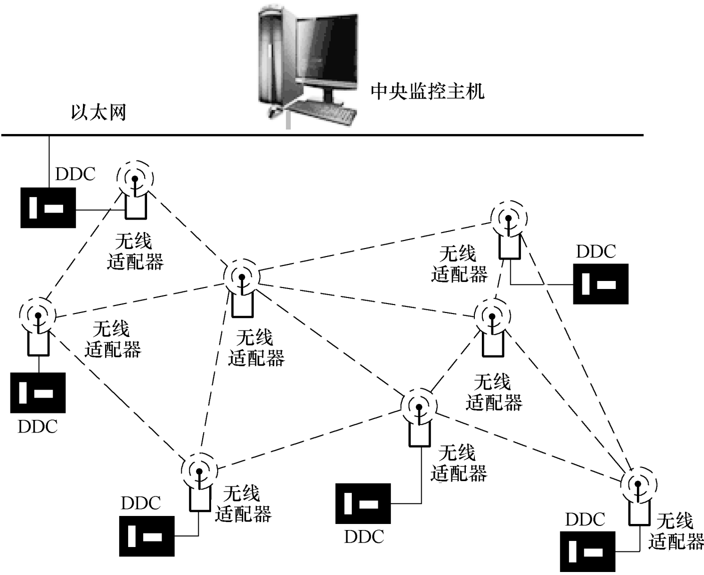


图 13-5　系统架构

TAC Andover Continuum BAS 的无线扩展解决方案完全基于 BACnet 和 ZigBee/IEEE 802.15.4

标准，使用全球统一的 2.4GHz 频率范围。Andover Continuum BACnet 控制器同 ASHARE 135—2004 一致，同其他 BACnet 标准控制器能成为 Andover Continuum 系统中的无线网络的一部分。TAC Andover Continuum BAS 无线解决方案由以下硬件和软件构成：

1）Cyberstation 工作站软件。

2）Andover Continuum BACnet 控制器。

3）ZigBee/BACnet 标准无线模块。连接 BACnet 控制器的 RS-485 接口，建立一个无线网状拓扑（mesh）网络。

4）图形化维护工具功能强，管理和维护稳定的 ZigBee/IEEE 802.15.4 标准的无线网络。使用标准化的 ZigBee/BACnet 无线模块，满足开放系统架构的即插即用需求，方便灵活。通用性强，有效地扩展了 BAS 的功能和应用范围。

13.5 基于 BACnet/Web Services BAS

13.5.1 Web 技术和 XML

1. Web 技术

（1）Web 技术

Internet 上有大量的、多姿多彩的网页，它是用 HTML 写成的。HTML 是一种特定类型的超文本编程语言，用 HTML 编写的文件可以存储在 Web 服务器上，并可由诸如 IE（Internet Explorer）、Netscape 等浏览器来浏览。

HTML 是一种描述文档结构的标识语言，它使用一些公共约定的标签来标记 WWW 上的信息。用户使用浏览器浏览 HTML 文件时，浏览器程序自动解释这些标记，并按特定的格式显示，但 HTML 写出的页面，标签规定了排列的格式以及超链的实现，其余的文本部分（ASCII）不会有与操作系统及程序相关的信息，任何文本编辑器都能够读取，即 HTML 文件是用（ASCII）码写成的，它有两个部分：文件内容和描述文件格式、特性的标识元素标签。

所谓的 Web 技术就是基于 HTML 和升级的 HTML，使用浏览器屏显的 Internet 资源组织技术，该技术中包括了交互式表单控件技术、各种脚本编程技术和相关的 Web 编程技术，合成了网页形式的文件，并可以嵌入复杂的控制功能。

一个使用 HTML 语言并嵌入了 VBscript 脚本控制程序 Web 文件的源代码如下：

```
<HTML> <HEAD> <TITLE>12 月 13 号实验分组查询</TITLE>
<SCRIPT language = VBscript>
<! --
sub check( )
tempage = cint( Document. F. age. value)
if tempage < 18 then
msgbox "您被分为第一实验组,做 DDC 的编程实验;记住时间是上午 10:00 准时开始"
else
msgbox "您被分为第二实验组,做 963 监控软件的使用实验;记住时间是下午 2:30 准时开始。"
end if
end sub
-- >
```

```
</SCRIPT>
<META content="MSHTML 6.00.2900.2912" name=GENERATOR></HEAD>
<BODY >
<H3>通知 </H3>自 03-1 班的学生总数是 35 名，为进行楼宇自动化课程的两个不同实验，将 35 名同学分为两个组，第一组做 DDC 的编程实验；第二组做 963 监控软件的使用实验。按学号分成两个组：第一组上午实验；第二组下午实验。请自动输入学号确定实验时间<BR>
<FORM name=F>您的学号是：<INPUT type="TEXT" size=4 name=age><BR><INPUT onclick=check() type=button value=确定> </FORM><B>
…………….
</BODY></HTML>
```

“<SCRIPT language = VBscript>”表示嵌入了 VB 脚本控制程序；<FORM>、</FORM>表示引入一个表单文件。

（2）Web 技术中包括的其他脚本语言

除了 VBScript 和 JavaScript 和两种常用的脚本语言外，在 Web 页面设计中还可使用一些其他的脚本技术和语言，主要有 JSP、PHP 和 Perl 等，它们主要用来设计服务器端的脚本。

2. HTML 的不足和 XML 的出现

（1）HTML 的不足

HTML 本身有很多不足：

1）HTML 把数据和显示格式存放在一起，不能只使用数据而不需要格式，而分离这些数据和格式较为困难。

2）HTML 的超链功能不是很强大，属于单点链接，功能上有一些限制。

3）HTML 缺乏空间立体描述，处理图形、图像、音频、视频等多媒体能力较弱，图文混排功能简单，不能表示多种媒体的同步关系等，也影响 HTML 的大规模应用，特别是复杂的多媒体数据处理。

4）HTML 的标记有限，不能由用户扩展自己的标记。

（2）XML 的出现

随着 Web 上数据的增多，HTML 存在的缺点和功能缺欠就变得不可忽略。能够把数据和它的显示分离开来的 XML 就出现了，其起源和发展过程如图 13-6 所示。后来，W3C 又用 XML 设计出一个与 HTML 4.0 功能等价的语言，称为可扩展 HTML（eXtensible Hyper Text Markup Language，XHTML），使之与 HTML 相兼容。

3. XHTML 和 XML

（1）XHTML

XHTML 作为一种 XML 应用被重新定义的 HTML，与 HTML 相比，XHTML 具有更加规范的书写标准、更好的跨平台能力。XHTML 也是网页设计语言的一种，目的是取代 HTML。

HTML 是一种基本的 Web 网页设计语言，XHTML 是一种基于 XML 的置标语言，类似于 HTML，是一个扮演着类似 HTML 角色的 XML，因此在本质上 XHTML 是一种过渡语言，结合了 XML 的强大功能及大多数 HTML 的简单特性。

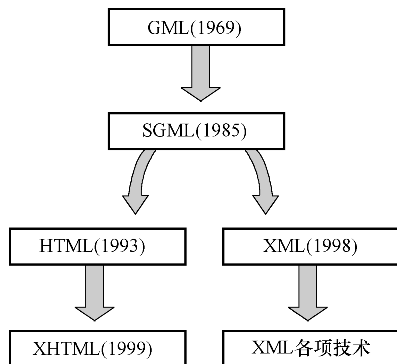


图 13-6　XML 出现发展过程

XHTML 是一种增强了的 HTML，其可扩展性和灵活性将适应未来网络应用更多的需求。XML 虽然数据转换功能强大，完全可以替代 HTML，但面对大多数基于 HTML 语言设计的网站而言，还不能够直接采用 XML。因此，在 HTML4.0 的基础上，用 XML 的规则对其进行扩展，即 XHTML 语言。XHTML 语言的建立实现了 HTML 向 XML 的过渡。

（2）XML

XML（eXtensible Markup Language，可扩展置标语言）是由 W3C（World Wide Web Consortium，互联网联合组织）于 1998 年 2 月发布的一种标准，是 SGML（Standard Generalized Markup Language，标准通用置标语言）的一个简化子集。由于它将 SGML 的丰富功能与 HTML 的易用性结合到了 Web 的应用中，以一种开放的描述方式定义了数据结构，在描述数据内容的同时能突出对结构的描述，从而体现出数据之间的关系。这样所组织的数据对于应用程序和用户都是友好的、可操作的。自 XML 推出以来，迅速得到软件开发商的支持和程序开发人员的喜爱，显示出强大的生命力。

4. 一个 XHTML 文件举例

应用例：应用 XHTML 设计网页文档。利用 XHTML 语言插入一幅图片 001. gif，设置图片的高度和宽度都为 300 像素，并在标题“第一个 XHTML 范例，与图片标题“学会放弃”之间插入一条水平线，设置水平线的大小为 10 像素，颜色为“fuchsia”。

程序清单：

```
<! DOCTYPE html PUBLIC  "-//W3C//DTD XHTML  1.0  Strict//EN"
"http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.did">
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">
<head>   <title>XHTML 应用范例</title>   </head>
<body>
<center>  <font size=" +2"  color="blue">第一个 XHTML 范例</font>
<hr size="10" color="fuchsia"/>
<font color="olive" size=" +2">学会放弃<br/></font>
<img src="tu009.jpg" width="300" height="300"/>
</center>
</body>
</html>
```

5. HTML、XHTML 与 XML 的区别

（1）对 XHTML 文档结构的要求

XHTML1.0 是在 HTML4.0 的基础上优化和改进的新语言，在文档结构上 XHTML 需要满足以下要求：

1）通过某个正式的 W3C XHTML DTD 验证；

2）根元素必须是 <html>；

3）根元素必须用 xmlns 属性指出名字空间；

4）根元素前必须有 <! DOCTYPE> 元素。

（2）语法要求

XHTML 与 HTML 最主要的不同之处体现在更严格的语法要求上：

1）XHTML 元素必须被正确地组织和嵌套。如必须有 <html> 标签。

2）元素的嵌套要一一对应，不能错位。

3）没有排斥规则，即标签对可以嵌套使用。

4）XHTML 的所有元素必须被关闭。如 </p> 在 XHTML 中不能省略，类似
 的空元素也要有结束标记，W3C 建议在“/”之前加一个空格。

5）标签名、元素和属性必须使用小写字母，XHTML 文档必须拥有根元素。

6）属性值必须有引号，属性不可以省略。例如，<option selected =” selected”>不能省略为 <option selected/>。

7）在文档中应用到的所有类似于“<”和“&”的特殊符号用编码表示。任何小于号（<），不是标签的一部分，都必须被编码为“<”；任何大于号（>），不是标签的一部分，都必须被编码为“>”；任何与号（&），不是实体的一部分，都必须被编码为“&”。

（3）HTML 和 XML

XML 和 HTML 都属于 SGML 的子集，但与 HTML 不同，XML 有 DTD。XML 是一种元标记语言，即可以像 SGML 那样作为元标记语言来定义其他文档系统，而 HTML 和由 XML 派生的 XHTML 都是实例符号化语言，不能定义其他文档系统。两者的不同点比较见表 13-4。

表 13-4　HTML 和 XML 的不同

比较内容	HTML	XML
可扩展性	不具有扩展性	是元标记语言，可用于定义新的标记语言
侧重点	侧重于如何表现信息	侧重于如何结构化地描述信息
语法要求	不要求标记的嵌套、配对等，不要求标记之间具有一定的顺序	严格要求嵌套、配对，并遵循 DTD 的树状结构
可读性及可维护性	难于阅读和维护	结构清晰，便于阅读和维护
数据和显示的关系	内容描述和显示方法一体化	内容描述和显示方法分离
保值性	不具有保值性	具有保值性
编辑和浏览工具	已有大量的编辑、浏览工具	编辑、浏览工具尚不成熟
结构描述	不支持深层的结构描述	支持结构嵌套可以复杂到说任何程度
与数据库的关系	没有直接的关系	与关系型和层状数据库均可对应和转换
超链接	单跳连接	可以定义双向连接、多目标连接、扩展连接
大小写	不区分大小写	区分大小写

6. XML 的特点和应用前景

XML 的特点：

（1）有良好的格式

（2）具有验证机制

XML 的标记是程序员自己定义的，标记的定义和使用是否符合语法，需要验证。XML 验证可以使用 DTD 方法，也可以使用 XML Schema 方法。

（3）灵活的 Web 应用

XML 中数据和显示格式是分开设计的，XML 元数据文件就是纯数据的文件，可以作为数据源，向 HTML 提供显示的内容，显示样式可以随 HTML 的变化而丰富多彩。XML 采用的标记是自己定义的，这样数据文件的可读性就能大大提高，也不再局限于 HTML 文件中的那些标准标记了。

（4）丰富的显示样式

（5）XML 是电子数据交换（EDI）的格式

XML 能够应用于各种领域的电子数据交换，控制信息不是采用应用软件的形式，而是采用谁都可以看得懂的标记形式来表现，所以 XML 非常适合作为数据交换。

（6）便捷的数据处理

XML 使计算机能够很简易地存储和读取资料，并确保数据结构精确。由于 XML 是以文本形式描述的，所以适合于各种平台环境的数据交换。同样由于使用文本来描述内容，可以越过不同平台的障碍进行正常的数据交换。当然，文本形式也会因为文字代码的不同造成不能阅读，但在这一点上，XML 有着非常完美的解决方案，避免了一般语言设计的缺漏，可支持国际化及地区化的格式。

（7）面向对象的特性

XML 的文件是树状结构的，非常符合面向对象的编程。

（8）开放的标准

用户可以在结构化的数据中嵌套程序化的描述以表明如何显示数据。XML 是不同应用系统之间的数据接口标准，是所有信息的中间层表示，是中间层应用服务器通用数据接口。

（9）选择性更新

使用 XML，数据可以进行局部小范围内更新，在源程序中一部分数据变化后，不需要对整个结构重新定义数据。

XML 是一个新兴的网络信息描述、组织和显示语言，就连比尔 · 盖茨也给予 XML 以很高的评价："新一代互联网的关键在于把握 XML"。人们纷纷预言：XML 将成为未来互联网领域占主导地位的标准通信协议，今后各类移动终端、台式终端都将安装使用 XML。XML 能够更准确地表达信息的真实内容，其严格的语法降低了应用程序的负担，也使智能工具的开发更为便捷。来自不同应用程序的数据也能够转化到 XML 这个统一的框架中，进行交互、转化和进一步的加工。借助 XML 可以准确地表示几乎所有类型的数字化信息，可以清晰地解释信息的内涵和信息之间的关联，可以在最短的时间内准确定位用户需要的信息资源。

XML 也可以用来描述软件设计中有关的对象模型，甚至能描述最终设计出来的软件。XML 及相关技术使得软件的分发及更新在 Web 上更容易实现。

XML 也存在一些不足：

1）由于采用树状存储结构，数据搜索效率高，但是插入和修改比较困难。

2）XML 的文本表现手法、标记的符号化等会导致 XML 数据以二进制表现方法的数据量增加，尤其当数据量很大时，效率降低。

3）XML 对数据的管理功能较数据库系统差许多。

4）XML 是元置标语言，任何个人、公司和组织都可以利用它定义新的标准，这些新标准之间的通信就会产生许多问题。

13.5.2　XML-Web Services

1. BAS 和 Web 技术

采用 Web 技术的软件均可以在 Web 浏览器上实现和屏显运行结果，由于 BAS 的管理网络一般就是以太网，中央监控主机实际上也是一个 Web 浏览器，因此 BAS 的管理网层次上的软件采用 Web 模式，大大降低了系统中对客户端管理程序的要求。用户只需要普通的 Web 浏览器，而不是专用的监控管理软件，就可以方便地通过 Internet 对 BAS 进行本地或远程监控管理。

2. XML-Web Services

在 IT 行业内，由于许多不同的系统使用不同的语言、不同的数据结构、不同的运行平台和

不同的协议，导致对这些异构系统进行集成和互操作非常困难。如何解决语言差异、数据差异、平台差异和协议差异造成的阻碍是 IT 行业所面临的技术难题。经过发展，XML/Web Services 技术成为 IT 业界较佳解决方案。XML/web Services 技术的主要目标是在 Internet 网络环境中构筑一个“与平台、语言和协议无关”的标准 Web 技术中性层，各种不同平台之上的应用依靠这个标准化的中间层实施系统集成和互操作。

在工控、楼宇自控和 IT 行业及领域，OPC［OLE for Process Control，用于过程控制的 OLE（Object Linking and Embedding，对象连接与嵌入）］技术是应用较为广泛的系统集成技术，但该技术受限于 Windows 系统平台。而 XML/Web Services 技术以其完全的开放性和发展潜力成为 BAS 实现接近无缝集成和互操作较优的解决方案。

目前全球只有 ASHRAE（美国暖通工程协会）和 oBIX（开放楼宇信息交换）两个组织从事基于 XML/Web Services 技术的智能建筑自控网络集成标准的工作。ASHRAE 推出了 BACnet/WS 标准，该标准基本上是针对 BACnet 标准进行的 XML/web Services 技术扩展。oBIX 作为 OASIS 组织（结构化信息标准促进组织）的一个技术分会推出了 oBIX 标准，推出 oBIX 的初衷是在认同多种楼宇自控网络技术标准共存的基础上实现所有异构楼宇自控网络在管理网络层级上的集成和互操作，进而实现与企业信息网络系统的无缝集成和互操作。

XML 就是标准的数据描述语言，Web Services 则是建立在该标准描述语言基础之上的互操作规范和接口模型，因此说 XML/Web Services 技术是使用 XML Web 技术使实现不同系统间通过互操作规范和接口实现互通信和互操作的技术。

在 Web 网络环境中，Web Service（Web 服务）基于用 XML 方式来解决异构分布计算和互操作的问题，在现有各种异构平台的基础上构筑一个平台无关、语言无关、协议无关的通用技术层，通过这个技术层，各种平台上的 Web 软件应用可以互相连接和集成，从而实现数据的自动化处理和互操作功能。XML/web Services 技术的运行机制内容之一仍然是服务器/客户的交互模式。

为了在 Web 网络环境中获得更通用的互操作消息或报文，XML/Web Services 技术仍然采用了 XML 标准对互操作消息或报文进行编码，形成了基于 XML 标准的通用型互操作规程，即 SOAP（Simple Object Access ProtocOL，简单对象访问协议）。XML/Web Services 技术在 Web 平台中定义了一组全新的协议栈或协议集，这些协议旨在使 Web 网络环境中实现异构系统的互操作。

13.5.3　Web 集成技术

1. 面向 Web 的集成技术的思想

面向 Web 的集成技术是利用 Web Service 技术进行系统集成的技术。使用 Web Services 技术能够在现有各种异构平台的基础上构筑一个平台无关、语言无关、协议无关的通用技术层，通过这个技术层各种平台上的应用系统可以互相连接和集成，从而实现互操作功能。实施 BACnet 标准的最主要目的之一就是实现异构系统的互操作，XML-Web Services 技术的最主要功能之一也是实现异构系统的互操作。

XML-Web Services 技术中的 XML 用于数据描述，SOAP 用于数据访问。利用 Web Services 技术进行多协议异构系统集成的思想是：首先，使用 XML 的数据描述功能将某个遵循特定协议的子系统包含的楼宇自控设备信息模型进行规范性描述，得到子系统的 XML 模型；第二步，使用 SOAP 数据访问功能对 XML 模型进行访问，从而实现多协议系统的系统集成。

2. BACnet/Web Services 接口标准

为了将 Web Services 技术应用于 BACnet 协议中，ASHREA 的 SSPC1 35 标准项目委员会制定了 BACnet/Web Services 接口标准草案。

BACnet/WS 标准定义了一组数据模型和一组 Web Services 接口，用来将不同数据源提供的数据集成到管理层网络中来。BACnet/WS 标准定义的数据模型和数据访问服务是通用的。

3. 基于 BACnet/Web Services 的 BAS

BACnet/WS 的优势在于能够实现将若干个使用不同通信协议的系统进行集成。这样一个包含 BACnet 协议和若干专有协议的 BAS 的系统集成如图 13-7 所示。BAS 的主服务器通过 BACnet/WS 标准与底层的系统通信，并向用户提供统一的基于 Web 的操作管理界面。

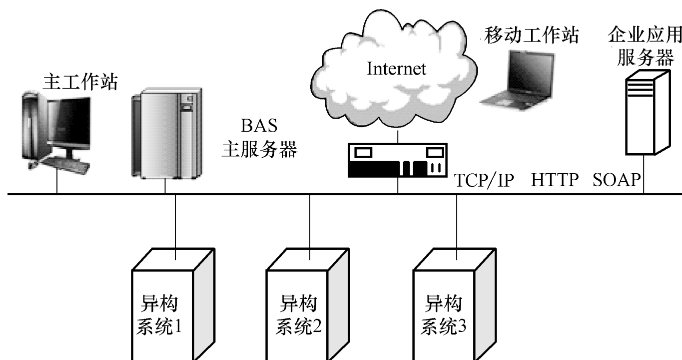


图 13-7 包含 BACnet 协议和若干专有协议的 BAS 集成体系

该 BAS 基于 BACnet/WS 标准开发，实现了楼宇设备的监控和管理功能，界面直观，用 Web 浏览器取代传统的工作站监控管理程序；用 XML 语言的形式来描述 BAS 的数据信息，可以很方便地将 BAS 的数据用于其他企业级应用程序中，比如可以直接将 BAS 的用电量做成 Excel 报表。

第 14 章　BACnet 技术的发展和技术融合

14.1　现代建筑中的通信网络覆盖和网络融合

14.1.1　现代建筑中的通信网络覆盖

建筑智能化与信息化系统中的网络通信系统实际上是很复杂的，现代建筑装备的网络通信系统有：

1）有线的局域网，如使用交换机构建的以太网；

2）PSTN（公共交换电话网）；

3）IEEE 802.11 系列的无线局域网；

4）第 2 代、2.5 代和第 3 代的 3G 移动无线网络；

5）卫星无线网络，包括 VSAT 卫星通信网；

6）各种接入网；

7）互联网。

在许多建筑物中，还存在着：

1）蓝牙网络；

2）NFC 近场短距离网络；

3）无线传感器网络；

4）使用免费频段的点对点无线网络；

5）UWB（超宽频）无线网络。

在装备 BAS 的建筑中，BAS 的管理网络层下面一般挂接着许多不同的实时性和可靠性很高的测控网络：

1）RS-232、RS-422、RS-485 控制总线；

2）LonWorks 控制总线；

3）MS/TP 控制总线；

4）CAN 总线；

5）ModBus；

6）EIB；

7）PROFIBUS；

8）C-Bus；

9）若干种工业以太网控制网络；

10）若干种实时以太网控制网络。

另外还包括一些数量较多的不同测控网络。

为解决现代建筑高层和地下空间无线信号覆盖不好的问题，建筑物的地下空间和高层还引入了合路的无线补充覆盖系统。将移动通信网络与 WLAN 融合至一个天馈系统中，形成合路系统覆盖的情况如图 14-1 所示。系统充分利用 3G、GSM（全球移动通信系统）、CDMA（码分多址）等移动通信网络与 WLAN 工作于完全不同频段的特点，使用专门设计的合路器，将移动通信网

络与 WLAN 合路融合至同一个天馈系统当中。实现了多种网络对地下空间的补充覆盖。

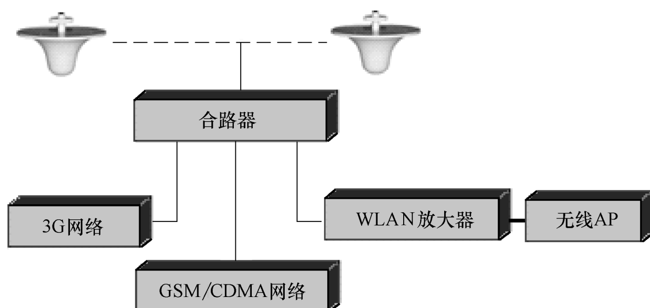


图 14-1　将移动通信网络与 WLAN 融合至一个天馈系统中

一个全向天线和吸顶式全向覆盖天线如图 14-2 所示。

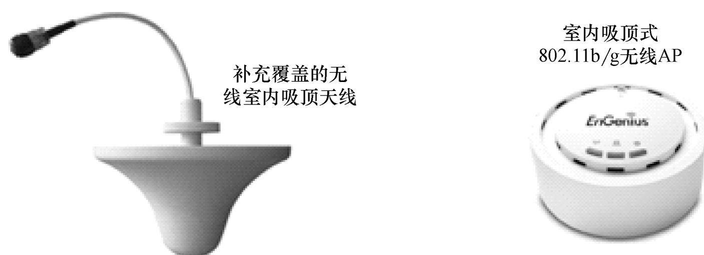


图 14-2　一个全向天线和吸顶式全向覆盖天线

现代建筑中覆盖着许多不同种类的网络，包括有线网络和无线网络，其中测控网络和语音网络属于实时网络，楼宇自控网络也是测控网络的一类。一部分网络属于非实时网络，归类于信息域网络，如 Internet、使用 IEEE 802.3 标准的以太网、BAS 的管理网络等。

14.1.2　网络融合

1. 异构网络的互联互通

异构网络的互联互通也叫网络融合。网络融合发展的道路：从一网融合到两网融合，再到三网融合以至 N 网融合。一网融合：通信网络内部的融合，即固定网络与移动网络融合。两网融合，即移动网络与互联网的融合，如 2.5G 的 GPRS、CDMA 1x 和 3G 移动无线网络与以太网的融合，进而和互联网的融合。近几年来，移动互联网大发展，实际上完成了两网融合。在两网融合的基础上，再与广电网进一步融合，就是我国当前正在大力推进的三网融合，即通信网、互联网和广电网的融合。

两网融合后，台式计算机和移动式计算机可以用移动通信网上网，手机也可以通过无线局域网 WiFi 接入有线网络和 Internet 互联。

对于网络融合，有些概念还需强调一下：

（1）有线网络和无线网络

凡是采用有形的物理线缆架构通信信道的网络就是有线网络，凡是采用无线方式构建通信信道的网络就是无线网路，无线方式可以是电磁波、红外、激光等方式。

（2）互联网

互联网一般是指 Internet。

（3）狭义的移动互联网

狭义的移动互联网指用手机上网。

（4）广义的移动互联网

承载通信的网络可能是移动网络，也可能是综合网络或多种异构网络中的任何一种网络。目前，70% ~80% 的人们上网是在室内通过有线方式完成的，而在广义的移动互联网时代，所用的终端设备不仅仅包括手机，而且还包括平板电脑、掌上电脑、PDA、智能电视和其他各类智能终端产品。目前移动互联网的定义、边界仍未清晰。

（5）控制网络

控制网络是指测控网络，包括传统的控制总线、在工控和楼控领域中的各种现场总线、工业以太网、实时以太网等。

（6）混合网络

混合网络是指由多种不同的异构网络组成的网络，而且能够实现彼此的互联互通。

2. 阻碍网络融合发展的一些瓶颈因素

异构网络的互联互通，不仅对于信息网络有重大意义，对测控网络也是如此。但异构网络的互联互通技术的发展还要有较长的路要走，前面的障碍不仅仅有技术层面的，不同异构网络技术的运营和管理者之间存在着重大利益格局的差异这是一个不容忽视的问题。以目前的三网融合为例，有关部门对媒体的管控能力正进一步加强，运营商对所谓开放的三类业务兴趣不大。相关部门并不拒绝 IPTV（交互式网络电视），但三大部门（广电、电信和联通）都对这块业务兴趣不大，宽带业务被三大部门将 4.5 亿用户基本都各自抢占的一个较为相对固定的份额；固话语音业务逐渐萎缩，手机通信由于竞争运营商接近网间结算价格。广电部门担心，中国电信利用广电的光纤网络基础设施直接传输有线电视信号，对广电业务构成巨大影响。部分学者认为：广电是低价包月式的国家公共资源模式；互联网是低质低价模式；电信则是高质的、按时长和流量收费的模式。让这三个不同商业模式融合，以及让有公益性质的广电业和市场化的电信业竞争，有许多问题解决较为困难。

14.2　信息域网络与测控网络的互联互通

1. 信息域网络的举例

信息域网络当然是数据网络，信息域网络的特点就是对数据传输的实时性和可靠性要求不是非常严格，尤其是对实时性要求不是很高。在生活领域中，在工控和楼宇自控领域中，常见的信息域网络有：

1）使用交换机构建并使用 IEEE 802.3 标准中使用 CSMA/CD 媒体访问控制方法的以太网；

2）互联网；

3）BAS 的管理层网络和工控领域中的管理层网络；

4）办公以太网或商业以太网；

5）一些较大型的办公、科研和商业化应用的城域网和广域网。

2. 信息域网络的互联互通主要内容

在社会生活、工控领域和楼宇自控领域中，以下一些网络的互联互通属于信息域网络的互联互通。

1）为实现远程监控，BAS 的管理网络与互联网的互联互通。

2）为扩展系统，BAS 的管理网络与所在区域附近的其他信息域网络的互联互通，如和另外一个或若干个其他 BAS 的管理网络互联。

3）办公网络、商业用网络之间的互联。

4）办公局域网、商业用局域网与互联网的互联。

5）工控领域的管理层网络与其他信息域网络的互联。

6）一些较大型的办公、科研和商业化应用的城域网和广域网之间的互联。

由于信息域网络较普遍地使用以太网技术，因此信息域网络的互联互通是较容易实现的。

3. 测控网络和非信息域网络举例

测控网络就是控制域网络，主要是为实现和完成一定的监控目的、能够对许多现场物理量进行实时采集和实时控制的网络。常见的测控网络有：

1）基于 IEEE 802.11 标准的工业无线局域网；

2）应用于监控运行的蓝牙网络；

3）应用于监控运行的无线传感器网络；

4）工控领域和楼宇自控领域广为使用的 RS-232、RS-422、RS-485 控制总线；

5）在工控领域和楼宇自控领域使用较为普遍的性能优良的 LonWorks 控制总线；

6）BAS 的 BACnet：MS/TP 控制总线、PTP 网络、ARCNet、LonWorks 网络、以太网、BACnet/IP 网络等；

7）CAN 总线；

8）ModBus；

9）EIB；

10）PROFIBUS；

11）C-Bus；

12）各种现场总线；

13）应用于工业控制现场的若干种工业以太网控制网络，当然其中一部分工业以太网控制网络又是很好的 BAS 自控网络；

14）若干种实时以太网控制网络，主要用于工控领域，还有一部分可用于楼宇自控领域。

还有一部分通信网络是用于语音通信的，如 PSTN（公共交换电话网），第 2 代、2.5 代和第 3 代的 3G 移动无线网络，不能简单地划分为信息域网络或测控网络。提供实时语音通信的这些网络的实时性是很高的，实际上，如果将它们应用于测控领域，也可以认为是测控网络，但一般情况下，把它们并入测控网络是不合适的。

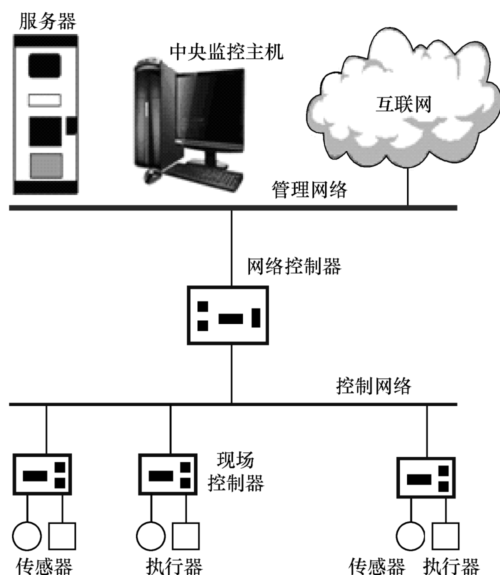


图 14-3　测控网络与管理网络的互联

4. 信息域网络与测控网络的互联互通

在工控或楼宇自控领域中，大量地使用信息域网络和测控网络的互联互通技术。工控系统中的现场控制网络或控制总线要与管理网络互联，BAS 中的测控网络要与管理网络互联。图 14-3 所示是一个 BAS 中较为普遍采用的一个典型结构。

控制网络和管理网络使用网络控制器实现连接，这里的网络控制器相当于一个网关，将两个异构网络互联，控制网络的数据传输速率不一定很高，但可靠性和实时性好；管理网络的数据传输速率较高，但可靠性和实时性不能满足测控网络的要求。在测控网络与管理网络互联形成的结构中，要注意瓶颈速率的问题。举例说：某 BAS 的管理网络采用 10Mbit/s 标准以太网，控制网

络采用 MS/TP 控制总线，前者的理论速率为 10Mbit/s，后者的速率为 76.8kbit/s，在管理网络中的通信速率是 10Mbit/s，但是在控制网络内的控制器通过管理网络和外网通信的速率还是 76.8kbit/s，这就是瓶颈速率。

测控网络与管理网络的互联一般情况下是通过网关实现的，采用网关的互联不是无缝互联，因为这是一种有边界的互联，在两种不同的异构网络之间有清晰的边界。

5. 一个测控网络接入信息域网络的举例

下面以一个无线传感器网络接入互联网作为一个测控网络和信息域网络互联的举例。互联网和无线传感器网络有各自的一些特点。互联网的协议开放性和通用性强，新开发的应用系统一般是以原有体系结构或支撑平台为基础的，并同现有系统兼容为目标。无线传感器网络是以数据为核心的短距离低功耗无线网络。

测控网络接入信息域网络的技术也可以看作一种接入技术，实现这种接入技术的内容是丰富的。如在无线传感器网络接入互联网时，就可以采用诸如网关策略、覆盖策略和无线网状网策略。网关策略关注应用层信息，为无线传感器网络与互联网提供连接支持；覆盖策略侧重协议栈改造；无线网状网策略充分利用协议自身强大的移动互联支持功能，为传感器网络接入提供一体化途径。

（1）网关策略

网关策略可以分为以下 3 种：应用层网关策略（也称为代理策略）、时延自适应策略和虚拟 IP 策略。网关策略最明显的特点是：需要配置专用的网关节点对无线传感器网络和互联网的数据进行双向解析和协议标准原语的翻译转换。

应用层网关策略由应用层网关通过 IP 与互联网主机相连；网关的另一侧与无线传感器网络连接，如图 14-4 所示。

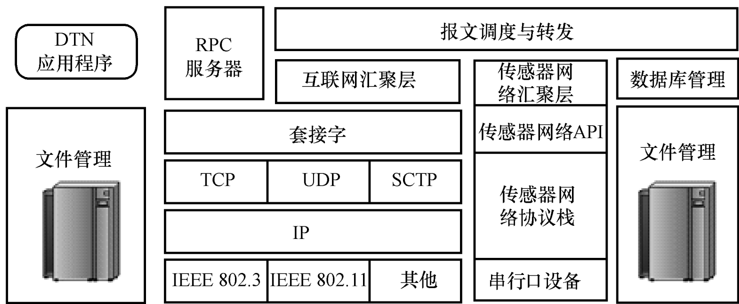


图 14-4　DIN（时延自适应网）协议栈结构

API—应用程序接口　DTN—时延自适应网　RPC—远程过程调用

SCTP—简单控制传输协议　TCP—传输控制协议　UDP—用户数据报协议

（2）时延自适应网策略

时延自适应网（DTN）策略是一种基于链路恢复的策略，主要思想是对协议栈进行改造，使不可靠、长时延链路具有常规链路的特征；另一种是基于代理服务器的策略，为接入异构网络配置代理服务器。

（3）覆盖策略

覆盖策略是一种对协议栈进行修改的方法，可以分为两种策略：一种是采用互联网协议覆盖传感器网络协议的策略，如图 14-5 所示；另一种是采用传感器网络协议覆盖互联网协议。传感器网络协议覆盖互联网的策略具有相当的灵活性，特别适合于将异构传感器网络通过互联网互联。缺点是传感器网络协议种类众多，很难找到一个通用的覆盖模式。但是随着网络应用模式或传感器网络协议的发展，传感器网络协议覆盖互联网的模式也许会得到较大规模的应用。

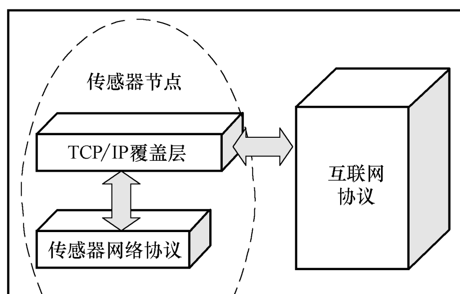


图 14-5　TCP/IP 网络覆盖传感器网络

关于使用无线网状网策略，这里就不再赘述。

14.3　短距离无线网络的互联互通

14.3.1　楼宇自控网络选择

楼宇自控网络的方案可以选用多种不同的网络。总体上讲有以下 6 类：

第一类：传统的 RS-485、RS-232 和 RS-422 等控制总线。

第二类：BACnet，及点对点（PTP）网络、MS/TP 控制总线、ARCnet、LonWorks 网络、以太网和 BACnet/IP 网络。其中 LonWorks 网络既归类于现场总线，又归类于 BACnet。

第三类：国内外广泛使用的现场总线网络。

第四类：一部分能应用于苛刻的工业生产环境的工业以太网。

第五类：一部分实时以太网。

第六类：遵循 IEEE 802.3 标准和使用 CSMA/CD 媒体访问控制方法的普通以太网也能应用于楼宇自控网络，不过 10Mbit/s 的标准以太网、100Mbit/s 的快速以太网在使用 CSMA/CD 媒体访问控制方法时适于组建较小规模的 BAS，当采用全双工模式后，IEEE 802.3 的带宽增加一倍。实际上，使用千兆位以太网作为楼宇自控网络是完全可以的。

除了以上这些网络外，移动无线网络、互联网、短距离无线网络都可以作为以上基本楼宇自控网络的补充和配合应用于 BAS 中和建筑智能化、信息化系统中。要实现 BAS 的远程监控，就要将 BAS 的管理网络接入互联网才行，接入互联网的方式可以是通过路由器直接接入、通过接入网接入、通过无线接入方式接入等。

这样一来，就存在着强烈的异构网络互联互通的需求，不仅仅需要管理网络（信息域网络）和测控网络（控制域网络）之间要实现网络融合，而且要求有线的测控网络之间、有线网络与无线网络之间实现融合。

14.3.2　什么是短距离无线网络的互联互通

1. 短距离无线网络及融合

以数据传输速率来分，短距离无线通信分为高速短距离无线通信和低速短距离无线通信两类。前者的最高数据传输速率高于 100Mbit/s，通信距离小于 10m，超宽带（Ultra WideBand，UWB）技术就是一种典型的高速短距离无线通信技术；低速短距离无线通信的最低数据速率低于 1Mbit/s，通信距离小于 100m，典型技术有 WSN（Wireless Sensor Network，无线传感器网络）技术、低速 UWB 技术、蓝牙技术等。

高速短距离无线通信技术支持各种高速率的多媒体数据应用，除了能够完成一般通信网的功能外，还能够进行高质量语音和视频文件的配送；低速短距离无线通信技术，主要用于家庭、生产现场控制、安全监视、环境监视等方面的应用。

随着短距离无线通信技术的快速发展，各种针对不同应用环境的短距离无线通信技术不断推出。从 WLAN 到通信距离半径仅有 10m 的蓝牙微网；WSN、近场通信、UWB 等新技术陆续登场，可统一称为短距离无线通信网络。

不同短距离无线通信网络之间的互联互通可以使数据从一种短距离无线通信网络向任何一种短距离无线异构网络传递，对任何区域都可以实现数据快捷和无需布线的无盲区覆盖。短距离无线通信网络之间的互联互通也是物联网实现的重要基础。

2. 短距离无线网络互联互通可实现建筑内无盲区的数据覆盖

短距离无线网络互联互通技术的发展对现代网络通信技术，建筑智能化、信息化技术的深入发展有着重大的意义，表现在以下一些方面：

（1）实现建筑内无盲区的数据覆盖

短距离无线网络互联互通可以实现：数据在任何区域都可以通过不同的异构网络实现接力传递，实现数据上下行的无盲区覆盖；不需要使用实际物理线缆，就能实现建筑内任何区域的数据覆盖。

（2）对现有通信网络技术的发展和应用产生重大影响

短距离无线网络互联互通的实现可以对现有通信网络技术的发展和应用产生多方面的重大影响。比如人们可以通过近场通信无需再进行连接操作就可以在移动存储和计算机系统之间进行较大数据量的数据交换和迁移，并通过短距离无线网络互联，进而再与广域网互联，将数据传送到远端的用户。

短距离无线网络与以太网无缝互联或可以大幅度提高这些短距离无线网络的使用效能和在社会生活及工业控制领域中的应用深度和广度。

（3）提高工业现场中机电设备的控制准确度和节能

通过不同制式短距离无线网络的互联互通，进一步实现测控网络、短距离无线网络和以太网的互联，大幅度降低由多种不同制式的异构网络组成的控制系统的复杂程度，从而提高对工业现场中设备实施的控制准确度。同样如此，可以大幅度降低未来智能楼宇中组成复杂的 BAS 的复杂程度和对建设机电设备的控制准确度。控制准确度的提高将产生较好的节能效果。

3. 技术的发展现状

在不同短距离无线网络间的互联互通技术研究现状方面，国内的部分研究所、高校在这方面做了不少的工作，诸如开发无线局域网与以太网互联的网关、无线传感器网络与无线局域网互联的网关、Ad Hoc 网络与 Internet 互联技术、基于数字信号处理器（DSP）的工业现场蓝牙网关、地铁换乘车站的无线覆盖及互联互通。总的来讲，国内在这方面的研究较为零散、不系统，技术相对国外来讲较为落后，远没有形成一个较为成熟和系统化的理论体系为经济及制造商的产品开发提供理论支持，还有大量的问题有待解决。

国内的研究人员在短距离无线网络与 Internet 实现互连方面做了许多工作，基本上能够在实验室环境中实现互联互通。在大区域覆盖的网络互联互通技术中，部分技术基本上已经成熟，如 2.5G、3G 都已经和 Internet 实现无缝互联。另外，下一代广播电视网、互联网和通信网实现互联互通，可以有效扩展服务信息的来源，并为使用不同终端的用户带来互联互通的服务，使用户之间的沟通更加便利和高效。当前，我国“三网融合”的进程明显加快，“三网融合”的工作已经被列为“十一五”规划中。

美国在网络的互联互通以及短距离低功耗无线网络的互联互通技术方面的研究在全球处于领

先地位，一些大学，如斯坦福大学的一些研究所人员早已完成使用专用网关来实现不同网络的互联互通，欧洲、日本这方面的研究工作也做了不少。尽管如此，欧美及日本等的短距离无线网络的互联互通技术发展方面也存在诸多不足，如关于这方面的系统性理论的建立工作还做得很不够。

短距离无线网络的互联融合为什么没有被作为热点被研究？之前的短距离无线网络在覆盖范围方面存在着空白：10m 的通信半径以下再无可以采用自组网方式进行连接的无线通信技术了，因此短距离低功耗无线网络互联互通的研究对象仅仅停留在蓝牙、WLAN 系统上，意义不大。

后来，ZigBee 网络、UWB 技术和 NFC 网络的出现和发展，短距离无线网络的内容极大地丰富了，短距离无线网络在用户附近区域能够配合其他多制式网络实现短中远距离和各种不同档次速率的数据网络覆盖，不同网络之间的互联互通有了巨大的市场需求。网络融合技术中包括了短距离无线网络之间的互联融合。

人们更多地将研究的视点放在大区域的网络互联互通上，对于个域范围无线网络的融合给予的关注远远不够，我们应该具有这种前瞻意识，率先进行短距离无线网络互联互通技术的研究，占领无线网络技术在这个方面的技术前沿，开发我国能够获得具有自主知识产权的先进技术、产品，为国内的相关产业发展提供系统的理论支持。

14.3.3　应用方向及前景

应用方向及前景表现在以下方面：

1. 在建筑内的任何区域都能实现高效能的数据覆盖

在没有网络物理线缆布设的任何区域都可以借助于无线广域网和中短距离网络的接力实现高效能的数据覆盖，真正实现在任何时候、任何地点和任何对象进行数据、语音及多媒体信息传递交流，而在常规的网络环境中无法做到这一点。在建筑内部的部分区域，如果没有网络线缆或信息网口，用户的台式终端就无法接入到互联网或其他的有线广域网或有线城际网中，当然通过 2.5G 或 3G 无线广域网可以使用户的移动终端接入无线广域网，再通过无线广域网接入 Internet、其他行业的广域网及城际网。但是在建筑物地下空间和中高层建筑物中，移动无线网的覆盖有盲区，因此用户所在的建筑物中存在数据覆盖盲区无法进行数据或语音通信。通过短距离无线网络的互联，移动终端或者台式终端可以方便地迁移到建筑物内的任何区域，将数据覆盖接入进来。

2. 通过 NFC 实现数据在用户终端上的上行传输和下载

近年来发展迅速的 NFC（Near Field Communication，近场通信）短距离无线通信技术，作用距离在 10cm 左右。NFC 具有双向连接和识别的特点，工作于 13.56MHz 频率，在单一芯片上结合感应式读卡器、感应式卡片，能在短距离内与兼容设备进行识别和数据交换。植入 NFC 芯片的计算机、数码相机、手机、PDA 等多个设备之间可以方便、快捷地进行无线连接，实现数据交换。

NFC 的短距离交互大大简化了整个认证识别过程，使电子设备间互联互通变得简捷了。当 NFC 芯片被置入接入点后，只要将其中两个终端靠近，就可以自动实现连接，比配置 WLAN 连接容易得多。与蓝牙连接相比，NFC 面向近距离数据交互，适用于交换隐秘或敏感的个人信息等重要数据；蓝牙能够弥补 NFC 通信距离不足的缺点，适用于较长距离数据通信。因此，NFC 和蓝牙互为补充。

NFC 技术能快速自组织地建立无线网络，为蜂窝设备、蓝牙设备、WLAN 设备提供一个“虚拟连接”，使电子设备可以在短距离范围进行通信。

NFC 应用系统成本低廉和方便易用，通过一个芯片、一根天线和一些软件的组合，就能够实现各种设备在几厘米范围内的通信，费用低廉。但由于 NFC 的数据传输速率较低，仅为

212kbit/s，所以不适合诸如音、视频流等需要数据传输速率较高的应用情况。

3. 使 ZigBee 网络的数据通过 Internet 传输到远端的监控中心

ZigBee 网络是由许多传感器节点以自组网方式构成的无线网络，网络中诸节点可以协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被探测对象的物理信息，并且将这些信息通过短程或中远程的传输网络传送给监控中心进行处理。ZigBee 网络由 4 个部分组成：传感器节点、网关节点、传输网络和远程监控中心。传输网络可以是短距离的点对点有线或无线的传输信道，也可以是包含多种异构网络互联的传输网络，包含多种异构网络互联的传输网络中即有有线异构网络的互联，也有无线异构网络的互联，无线异构网络中用得较多的就是短距离无线网络的互联。

4. 通过 UWB 网络实现无盲区的高速率数据覆盖

通过 UWB 网络实现与其他网络的互联互通，用户的台式或移动终端可以在任意地点实现高速率数据上行或下载，当然数据传输速率受到参与互联的网络瓶颈速率的制约。

UWB 技术是一种新颖的无线传输技术，适用于短距离无线个域网应用，大体上可分为高速和中低速两类应用。高速 UWB 的传输速率目前可达 100Mbit/s ~ 1Gbit/s，传输距离可达 10 ~ 30m，属于高速短距离传输；中低速 UWB 传输速率一般在 2Mbit/s 以下，最高不超过 30Mbit/s，传输距离可达 100m 以上，甚至几公里，属于中低速中短距离传输。

超宽带的典型应用领域之一：高速无线短距离连接，在建筑环境中与无线局域网技术互补。消防、安全防范系统的通信中，UWB 系统可穿透障碍物特性使其有越来越深入的应用。使用 UWB 技术，建筑内存储的视频数据源可在 PC、DVD、TV、PDA 等设备上共享观看；使用 UWB 技术，可随时方便地同 Internet 交互信息。使用 UWB 技术开发的 UWB 探测装置，可用来检查混凝土结构建筑中的缺陷，可用于地下管线、电缆和建筑结构的定位。

UWB 最具特色的应用之一是随时在建筑内构建可以进行视频传输的无线个人局域网。IEEE 802.11g 应用系统可以处理视频数据，但处理成本较高；UWB 有可能在 10m 范围内，支持高达 110Mbit/s 的数据传输速率，不需要压缩数据，可以快速、简单、经济地完成视频数据处理。蓝牙应用系统由于速率低，也不适合传输视频数据。

5. 短距离无线网络的互联互通技术向测控网络延伸

短距离无线网络的互联互通技术可以顺理成章地延伸到生产现场的测控网络。生产现场的测控网络可以由多种不同的控制总线架构，由于不能实现互联互通，各个控制总线组成的控制区域都是局部和彼此不能联通的离散控制域，如果实现了互联互通，彼此离散的控制域就将被联通起来，形成大区域的控制域，提高监控准确度和效能，降低构建整体系统的建设和维护保养成本。

总的来讲，在建筑智能化、信息化技术中，短距离无线网络是现代建筑内通信网络的重要组成部分，短距离无线网络的互联互通技术也是现代建筑内通信网络技术的重要组成部分。短距离无线网络的互联互通技术不仅在工业控制领域内有重要应用，在智能化楼宇中也一样有重要作用。

14.4　构建楼宇自控网络的优化模式

14.4.1　现有楼宇自控网络的结构特点及不足

有两大类结构的 BAS：一类是使用层级结构的 BAS；还有一类是使用通透以太网的 BAS。实质上，如果将直接挂接智能控制器的以太网视为控制网络，则后一类结构也隶属于前一类结构。但情况复杂在：管理网络一般情况下就是普通的使用 IEEE 802.3 标准和 CSMA/CD 媒体访问控制

方法的以太网，多数情况下，还使用半双工模式工作。而处于控制层级的以太网，选用和管理网络一样的以太网仅仅是一种应用情况，多数情况下，选用的以太网是指工业以太网或实时以太网的某一种，如前所述，选用 100Mbit/s 的标准以太网并设置在全双工模式下构建小规模的 BAS 也是一种较好的方案。如果采用千兆位以太网作为控制层网络，构建较大规模的 BAS 也是一种很好的架构，千兆位以太网一般均工作在全双工状态，但现在将千兆位以太网应用在 BAS 的情况很少见。

如果楼宇自控网络采用现场总线，则要配套选用合适的网络控制器，完成控制总线和管理网络的互联。

在 BAS 的控制网络层级，还可以选取不同的工业以太网或实时以太网作为控制网络。

工业以太网和实时以太网与使用 IEEE 802.3 标准及 CSMA/CD 媒体访问控制方法的普通以太网是不同的网络，因为每一种工业以太网或实时以太网都有自己特定的协议栈，以 EtherNet/IP 网络、PROFINET 网络为例，这两种网络都是实时以太网，EtherNet/IP 网络在 IEC 发布的实时以太网系列 PAS 文件中的 IEC/PAS 标准号是 IEC/PAS 62413。

TCP/IP 体系结构及对应的协议与物理网络如图 14-6 所示。

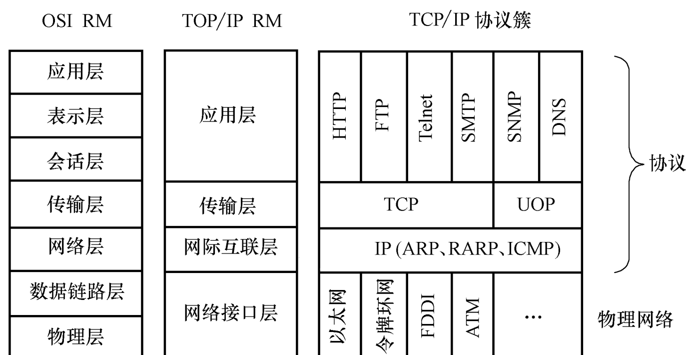


图 14-6　TCP/IP 体系结构及对应的协议与物理网络

将 EtherNet/IP 通信协议模型、EtherNet/IP 协议栈结构同 TCP/IP 体系结构及对应的协议与物理网络进行比较可看到，但是在协议栈，EtherNet/IP 的协议栈或体系结构基于 TCP/IP 体系结构，对应层级及不同的协议模块进行了重新定义，EtherNet/IP 协议簇中的多数协议与 TCP/IP 协议簇中的协议是相同的。

通过以上的对比分析可看到，普通的以太网比如 10Base-T、100Base-T 网络还不能简单地直接同实时以太网互联，但普通以太网与实时以太网之间互联和普通以太网与其他控制网络互联的情况相比，异构程度低得多。进行网络融合的难度小得多。再说，普通以太网的通信接口是普通 RJ-45 接口，实时以太网也使用 RJ-45 接口，但要求能够适应苛刻的工业生产现场环境的使用。

14.4.2　现有楼宇自控网络的结构缺欠

BAS 较常应用的控制网络有：

（1）传统的控制总线

RS-485、RS-232 和 RS-422 等。

（2）BACnet 支持的 6 种控制网络

PTP 网络、MS/TP 网络、LonWorks 网络、ARCnet、以太网和 BACnet/IP 网络等。

（3）部分现场总线

CAN 总线、EIB、CEBus、ModBus 和 PROFIBUS。

（4）工业以太网和实时以太网的一部分

如 Ethernet/IP、PROFINET、EtherCAT 网络和 ModBus/TCP 网络等。

使用 RS-485、RS-232 和 RS-422 控制总线时，不需要使用网络控制器，典型系统如西门子的 Apogee 系统，如图 14-7 所示。

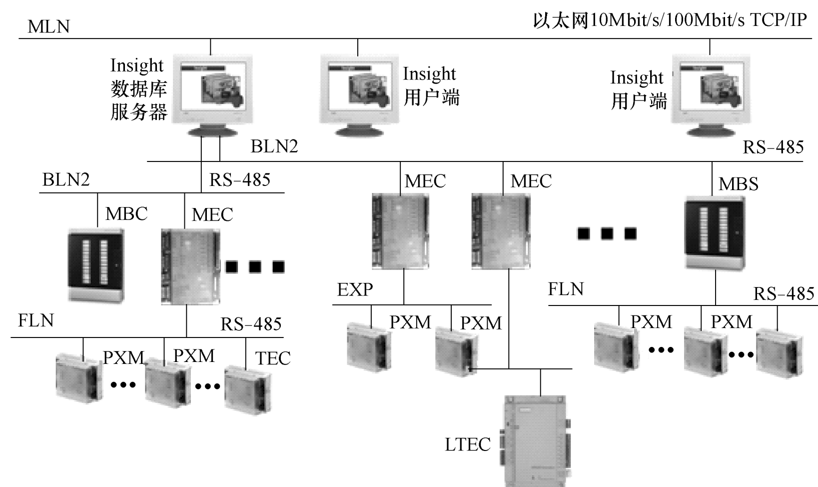


图 14-7 Apogee 系统的三层网络结构

在图 14-7 中，各层网络的名称和功能如下：

1）MLN：管理层网络。

2）BLN2：楼宇层网络。

3）FLN：楼层级网络。图 14-7 中挂接在各个不同层的控制器的功能可用其名称来描述：图 14-7 所示的 Apogee 系统的控制网络采用了 RS-485 总线，而且控制网络也分成了好几个分层，由于使用了多个层级的控制网络，所以现场控制器也做了分层：

① BLN 上的常用 DDC。

② FLN 上的常用 DDC。

a. PXM：点扩展模块。

b. TEC：终端设备控制器。

这里的 BLN 共有 3 种类型：RS-485 BLN、Ethernet BLN、远程（Remote）BLN。

从 Apogee 系统的网络结构中看到，使用 RS-485 总线，由于 RS-485 总线的标准是工作在物理层的，因此不再需要网络控制器将其与管理网络互联。

柏斯顿的 IBS-5000 系统架构如图 14-8 所示。IBS-5000 系统整个系统架构在两层网络上，第一层为管理网络，控制层网络是 CAN 也可以是 RS-485 控制总线。

系统的自控网络林林总总，可以采用各种各样的控制网络，而这样层级结构的 BAS 有以下缺欠：

1）每一种控制网络和管理网络都必须通过网络控制器或全局控制器来实现互联，而这种网络控制器或全局控制器一般均为系统生产厂商开发生产，是厂商的专有产品，不能由多厂商提供，形成 BAS 开放性的重大障碍之一。

2）如果在某个特定的 BAS 的控制网络中加挂 1 种、2 种或多种其他种类的控制网络，如常用的 CAN 总线、ModBus 和 PROFIBUS，那就形成一个控制域分别由若干个离散的控制域组成的控制系统，不同的离散域通过挂接网关来连通形成一个连通域，而且使用这种方式形成的连通域

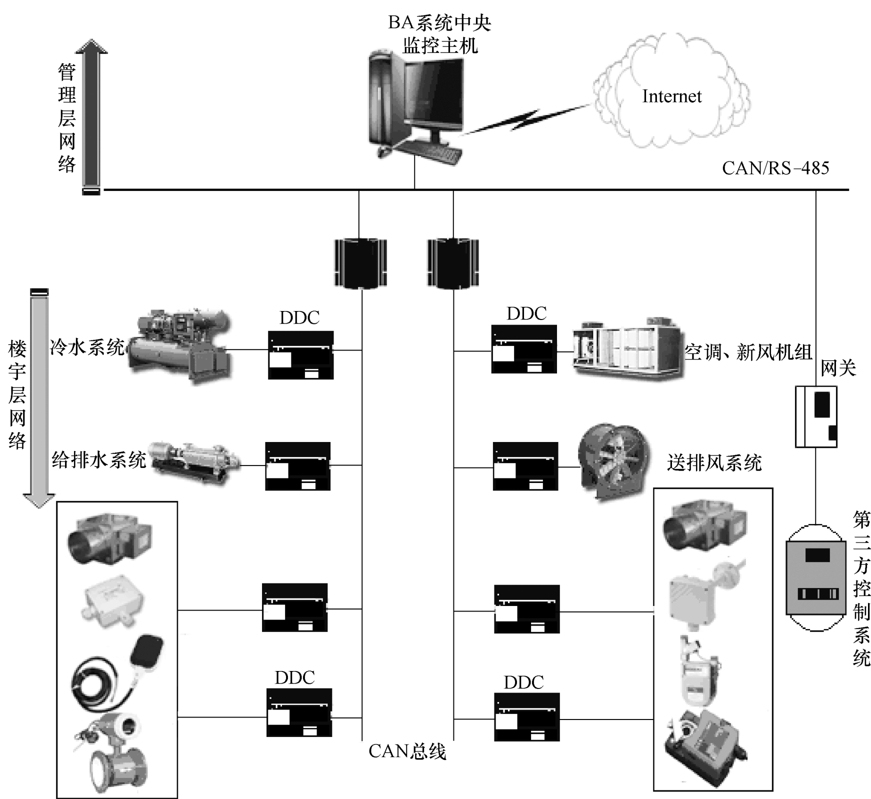


图 14-8　IBS-5000 系统架构

在控制性能方面不好；由于异构程度高，使异构系统的无缝互联情况变得较差；系统整体的复杂程度高，导致维护保养的难度和成本都很高。将若干个离散的控制域连通为一个连通域的网关连接法情况如图 14-9 所示。

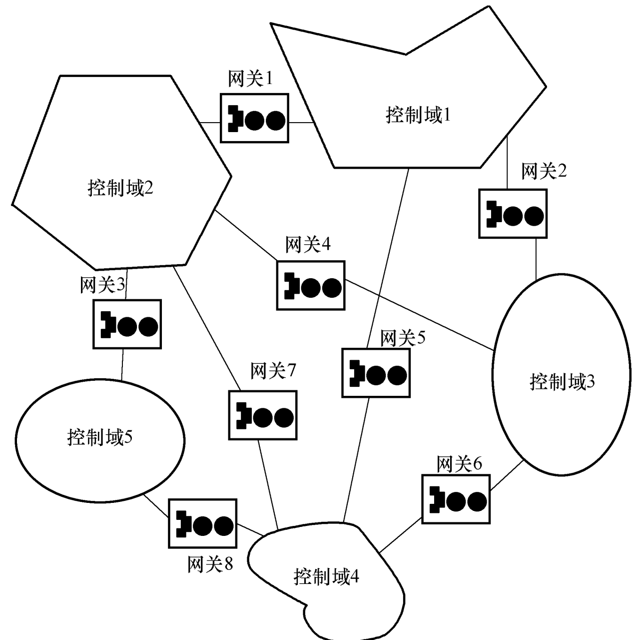


图 14-9　将若干个离散的控制域连通为一个连通域的网关连接法

从图 14-9 可看出，各个不同的控制域彼此离散，当控制网络上进一步挂接不同的异构系统较多时，系统变得非常复杂，整个控制系统的连通域性能很差。

如果将这样的多异构网络构成的复杂构架再通过网络控制器和管理网络（以太网）互联，整个 BAS 的性能就会变差，如图 14-10 所示。

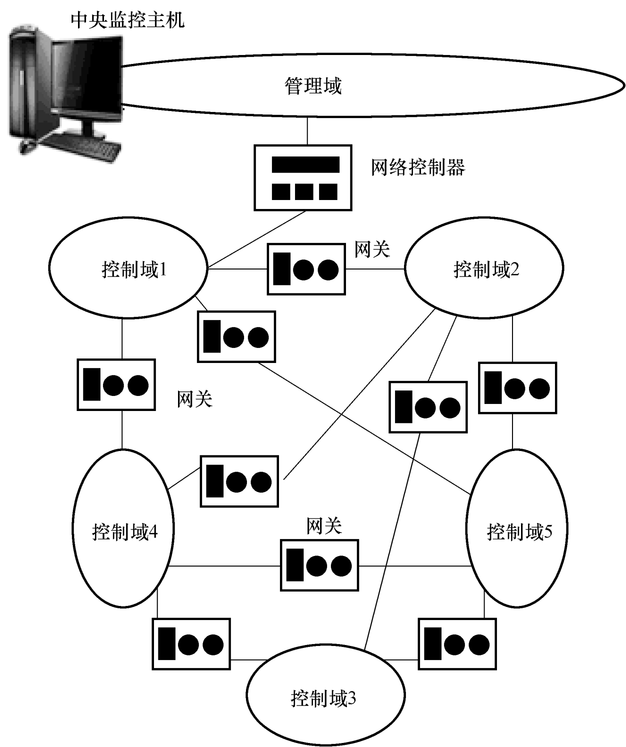


图 14-10　复杂架构控制网络通过网络控制器和管理网络互联

图 14-10 中，5 个离散的控制域彼此通过网关互联，构成一个连通域，每一个离散的控制域代表一个使用特定控制网络技术的异构系统，再由第一个控制域即第一个控制网络与管理网络通过网络控制器互联。生产厂商在很多情况下，为了使生产开发的 BAS 能够将一些市场占有率较高的现有系统接入，不得不去开发一些网关，使系统变得更为复杂和难于维护，使设计和使用难度加大。

14.4.3　架构楼宇自控网络的模式选择

目前，国内外不同品牌的 BAS 有几十种，尽管控制系统彼此不同，但控制对象基本上是相同的，都是对新风机组、空调机组、风机盘管、变风量空调机组、冷水机组、给排水系统等实施监测和控制。为了构建性能优良和性价比高的 BAS，选择好楼宇自控网络是十分重要的，BAS 的性能和性价比在很大程度上取决于楼宇自控网络选择，下面是进行 BAS 设计时，可选择的楼宇自控网络结构种类：

1. 管理网络 + RS-485 结构

管理网络 + RS-485 结构的具体组态内容是：管理网络采用遵循 IEEE 802.3 协议的 10Mbit/s 或 100Mbit/s 的普通以太网，西门子 Apogee 系统和柏斯顿的 IBS-5000 系统的自控网络都是典型实例。

2. 管理网络 + BACnet 标准支持的网络

BACnet 互联网络可以使用灵活的局域网络配置，以便应用于不同的目的，而且还可以扩展

BACnet 通信系统，采用其他通信系统，如 IP 网络等。

管理网络 + BACnet 标准支持的 4 种网络情况如下：

（1）管理网络 + PTP 网络

（2）管理网络 + MS/TP 网络（典型的 BACnet 系统）

MS/TP 网络是 BACnet 标准自定义的局域网。该局域网采用 EIA-485 标准，工程实施价格低，特别适用于对通信速率要求不高的现场级网络系统。另外，MS/IP 网络可以工作在 3 种模式下：主—从模式、对等模式和主从/令牌模式。这 3 种运行模式可以用相同的 MAC 算法进行通信信道访问，应用于不同的系统和场所，但不同模式下的 MAC 地址分配却有所不同[41]。

（3）管理网络 + LON 网络

LON 作为 BACnet 系统的通信子系统，其作用与其他局域网相同，用于传输 BACnet 互操作信息。但 LON 网络开发需要通过 LonBuilder 网络开发工具和 NodeBuilder 节点开发工具来进行。LON 网络支持多种传输介质，并且通信速率可调范围大（32kbit/s ~ 1. 25Mbit/s）。LON 网络既可以应用于高端网络，也可以应用于低端网络。但由于 LonWorks 技术及应用系统开发费用较高，其应用也受到了较大影响。这种组态应用较多，如江森公司的 Metasys 系统。

（4）管理网络 + ARCnet 网络

（5）管理网络 + 以太网

这种组态模式的 BAS 有着非常好的前景。

3. 管理网络 + 部分现场总线控制网络

一部分现场总线网络，如 CAN 总线/ModBus、EIB、PROFIBUS 和 C-BUS 网络等。

4. 管理网络 + 工业以太网或实时以太网

这种组态的内容较为丰富，但不成熟的方面也不少，需要理论界和工业界的工程技术人员共同配合，对这种组态的楼宇自控网络形成系统化的理论和系列化的产品。

楼宇自控网络组态的优化选择，要与具体的应用系统和应用行业、领域和被控对象紧密配合，才能设计出性价比高、性能优良和节能效果良好的 BAS。

5. 管理网络 + BACnet/IP 网络组态

14. 4. 4　优化的楼宇自控网络模式及组织

前面已经讨论了当控制网络通过网关挂接不同的异构系统之后，系统的复杂程度大幅度提高，使设计难度增加、工程实施难度加大、成本提高、系统调试难度加大、后期的维护保养工作复杂、后期维修的难度都大幅度提高。

以太网采用了 TCP/IP，采用 TCP/IP 的网络又称为 IP 网络，如果采用 IP 网络作为连接各个异构网络的公共平台，BAS 的开放性会大幅度提高，生产厂商可以在非 IP 网络的异构网络之间的网关产品开发投入较小的精力，在异构网络和 IP 网络之间网关产品开发投入更多的精力，提高 BAS 关键设备的通用性和性价比。一个优化的楼宇自控网络模式如图 14-11 所示。

在优化的楼宇自控网络模式中，异构网络系统 1、异构网络系统 2…指的是由不同的控制网络组成的控制系统，也可以理解为不同的控制网络，如 CAN 总线、ModBus、EIB、PROFIBUS 和 C-BUS、MS/TP 总线、LonWorks 网络等。每一种不同的控制网络组成的系统都形成一个控制域。中央监控系统挂接在 IP 管理网络上，在接入 Internet 后，可以实现远程监控。

也可以用图 14-12 表示这种以 IP 网络作为连接各个异构网络的公共平台的关系。

如果采用优化的楼宇自控网络模式，BAS 甚至工控系统中的网关设备都可以标准化。

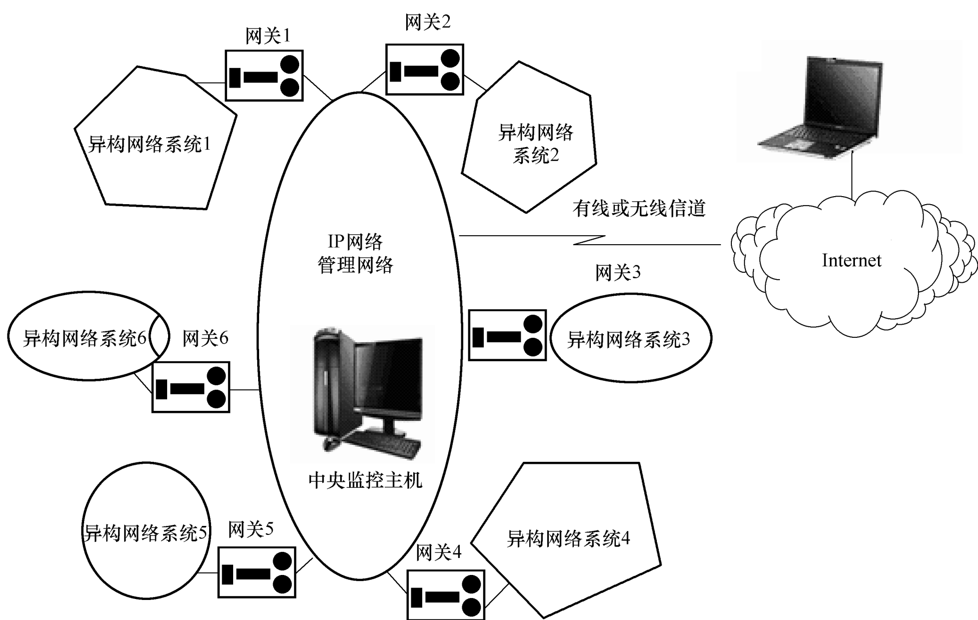


图 14-11　优化的楼宇自控网络模式

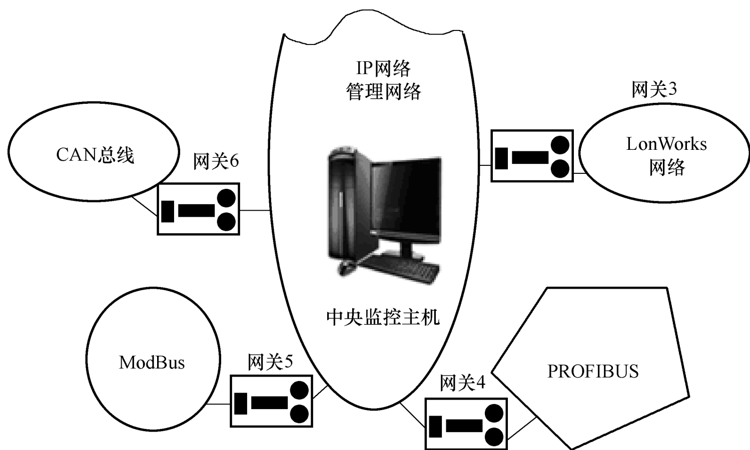


图 14-12　以 IP 网络作为连接各个异构网络的公共平台

进一步讲，BAS 中的自控网络可采用普通以太网（用来组建小规模的 BAS）、工业以太网或实时以太网，如图 14-13 所示。图 14-13 中的各个工业以太网与普通的 IP 网络的异构程度相对于其他的控制网络要低得多，将这些网络接入 IP 网络，使用一定的适配器或简易的网关就可以完成，而且这样结构组建的系统从一个整体的连通域来讲，系统的各个子系统互联的无缝隙程度、整体的控制性能都较高。

如果控制系统对控制的实时性要求并不是很高，就可以使用普通以太网，加上在控制网络设计之初就注意有效配置网络负荷，使得基于普通以太网通信技术的控制网络，也可以满足一些对实时性要求不那么高的监控系统的需求，如 BAS 等。

基于普通以太网技术的控制网络，在控制领域可以充分发挥出普通以太网所具有的技术成熟、软硬件丰富、性价比高等优势。基于普通以太网的控制网络，所采用的技术相对成熟，已经有了一些应用实例，但其应用范围要受到实时性要求的限制。

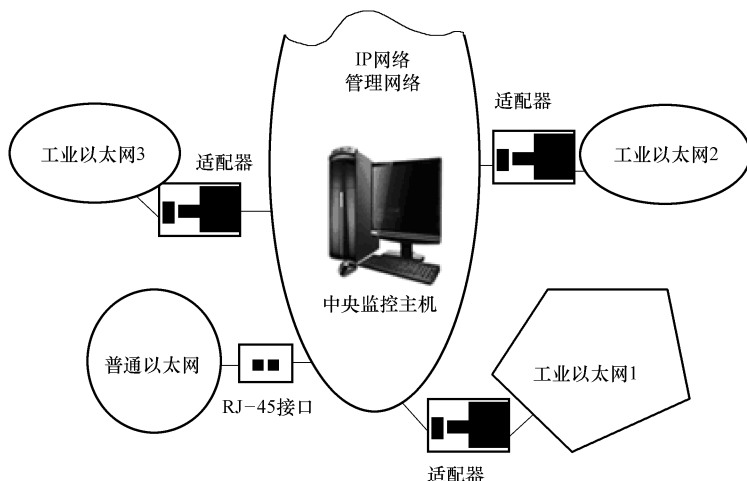


图 14-13　所有控制网均采用以太网 + 工业以太网的 BAS

14.5　BACnet 标准支持的楼宇自控网络的比较

14.5.1　性价比排序

这里的性价比是指构成系统的性能和构成工程应用系统的成本之间的关系。BACnet 标准支持的 4 种局域网和 PTP 连接技术的作用都是传输 BACnet 应用层服务的数据单元。这 4 种局域网是：ISO 8802.3（以太网）、ARCnet、MS/TP 控制总线网络，LON 网络。这 4 种局域网的性价比如图 14-14 所示。

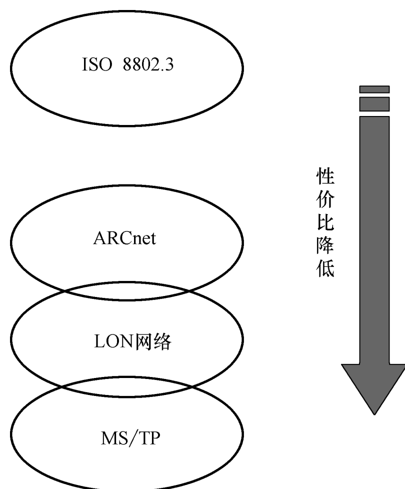


图 14-14　4 种局域网的性价比

14.5.2　ISO 8802.3 局域网的优、缺点

ISO 8802.3 是 BACnet 标准中所支持的速率最快的局域网，在 BAS 中一般作为楼宇自控网络的主干网，10Mbit/s、100Mbit/s 的以太网一般都能满足实际 BAS 的需要。在 ISO 8802.3（以太网）、ARCnet、MS/TP 控制总线网络，LON 中安的性能最好，但组建该网络的成本也最高。

该网络的主要优、缺点如下：

1. 优点

1）支持多种传输介质，如 UTP、光纤、同轴电缆。

2）传输速率高（10Mbit/s、100Mbit/s）。

3）协议由硬件接口实现。

4）使用范围非常广泛。

5）不需要使用专用的开发工具。

2. 缺点

1）价格偏高。

2）传输距离受到较大限制。

3）响应时间具有不确定性。

14.5.3　选用 ARCnet 的考虑

ARCnet 是一种令牌局域网，早期在北美国家有较多的应用，在我国的 BAS 中少有应用。ARCnet 的主要优缺点如下：

1. 优点

1）美国国家标准是 ATA/ANSI 878.1。

2）数据传输速率为 150kbit/s ~ 7.5Mbit/s。

3）协议由硬件接口实现。

4）不需要使用专用的开发工具。

5）数据传输速率越高，网络的性价比越高。

6）响应时间具有确定性。

7）支持多种传输介质，如 UTP、光纤、同轴电缆。

2. 缺点

1）低速应用时性价比较低。

2）硬件芯片单一。

3）网络覆盖范围受较大限制。

由此可知，ARCnet 通信的可靠性较高。

14.5.4　选用 MS/TP 网络的考虑

MS/TP 网络是 BACnet 标准自定义的楼宇自控网络，MS/TP（Master-Slave/Token Passing，主-从/令牌传递）协议是 BACnet 标准自行开发的专有协议，MS/TP 网络的物理层直接采用 RS-485 串行总线。MS/TP 网络可以工作在以下三种模式：主从模式、令牌模式和组合模式。MS/TP 网络的传输速率为 76.8kbit/s，尽管传输速率不高，但实时性、可靠性高，在 BACnet BAS 中，MS/TP 网络是通过专用芯片来实现的。MS/TP 网络是一种可以低成本实现的性能较好的控制网络。

该网络的主要优缺点如下：

1. 优点

1）由美国国家标准支持。

2）有专有芯片实现 MS/TP 协议。

3）实现成本低。

4）通信具有确定性。

5）不需要使用专用的开发工具，有助于进行工程应用开发。

2. 缺点

1）仅使用屏蔽双绞线一种传输介质。

2）数据传输速率较低（9.6kbit/s、19.2kbit/s、38.4kbit/s 或 76.8kbit/s）。

14.5.5　选用 LON 网络的考虑

支持 LON 网络技术的通信协议是 LonTalk 协议。使用神经元芯片（Neuron Chip）实现，神经元芯片内含网络 CPU、媒体访问 CPU 和应用 CPU。LON 网络支持多种传输介质和灵活的网络拓扑结构，传输速率可调范围大（32kbit/s ~ 1.25Mbit/s）。

1. 优点

1）可使用多种传输介质。

2）组网的拓扑结构灵活。

3）应用系统工作运行可靠。

2. 缺点

1）需要专门芯片支持，需要使用 LonBuilder 网络开发工具和 NodeBuilder 节点开发工具，系统开发难度较大。

2）传输距离有限。

3）应用受一定的限制。

14.6 BACnet 标准与 IPv6

经过多年的发展，IPv6 标准日益成熟，各种不同类型支持 IPv6 的设备相继问世，并逐渐进入商业应用。部分国外电信运营商已经建立 IPv6 网络，并开始提供接入服务。CNGI 工程对我国甚至全球 IPv6 的发展产生了巨大的影响，促使整个产业界把目光投入到这个新发展的领域，并以此建立一个成熟的 IPv6 产业链。在网络已经基本成熟的条件下，如何在其上为用户提供新的业务，并为运营商创造新的价值，是下一代互联网成功的关键。

IPv4 体制的 IP 地址尽管数量达到 40 多亿（2^{32}），但资源已经使用完毕，而 IPv6 具有长达 128 位的地址空间，其 IP 地址资源总量达到了 2^{128}，可以彻底解决 IPv4 地址不足的问题。此外，IPv6 还采用了分级地址模式、高效 IP 包头、服务质量、主机地址自动配置、认证和加密等许多技术。IPv6 把地址从 IPv4 的 32 位增大了 4 倍，即增大到 128 位，使地址空间增大了 296 倍，极大地扩充了地址空间资源。

14.6.1 IPv6 的地址结构和地址配置

1. IPv6 的地址结构

IPv6 的地址结构与 IPv4 不同。一个 IPv6 的 IP 地址由 8 个地址节组成，每节包含 16 个地址位，以 4 个十六进制数书写，节与节之间用冒号分隔，其书写格式为 X：X：X：X：X：X：X：X，其中每一个 X 代表 4 位十六进制数。除了 128 位的地址空间，IPv6 还为点对点通信设计了一种具有分级结构的地址，这种地址被称为可聚合全局单点广播地址（Aggregate Global Unicast Address）。开头 3 个地址位是地址类型前缀，用于区别其他的地址类型，其后依次为 13 位 TLA ID［“顶层聚合标识符,”，TLAID 标识了路由层次中的最高级别，TLAID 由 Infernet 号码分配管理局（IANA）管理，并分配给本地网络，它会按次序将单个 TLA ID 分配给 Internet 服务提供商（ISP）。在该字段中最多允许有 8192 个不同的 TLA ID］、32 位 NLA ID（NLA ID 用于标识特定的客户站点。NLA ID 允许 Internet 服务提供商创建多级别的寻址层次，以便组织地址和路由）、16 位 SLA ID（SLA ID 由某个组织使用，以便标识其站点中的子网）和 64 位主机接口 ID，分别用于标识分级结构中自顶向底排列的顶级聚合体（Top Level Aggregator，TLA）、下级聚合体（Next Level Aggregator，NLA）、位置级聚合体（Site Level Aggregator，SLA）和主机接口。

TLA 是与长途服务供应商和电话公司相互连接的公共网络接入点，它从国际 Internet 注册机构（如 IANA）处获得地址。NLA 通常是大型 ISP（Internet Service Provide，Internet 服务提供商），它从 TLA 处申请获得地址，并为 SLA 分配地址。SLA 也可称为订阅者（Subscriber），它可以是一个机构或一个小型 ISP。SLA 负责为属于它的订阅者分配地址。SLA 通常为其订阅者分配由连续地址组成的地址块，以便这些机构可以建立自己的地址分级结构，以识别不同的子网。分级结构的最底层是网络主机。

2. IPv6 的地址配置

通常，当主机 IP 地址需要经常改动时，手工配置和管理静态 IP 地址繁琐、困难。在 IPv4

中，DHCP 可以实现主机 IP 地址的自动设置。其工作过程是：一个 DHCP 服务器拥有一个 IP 地址，主机从 DHCP 服务器申请 IP 地址，并获得有关的配置信息［如默认网关、域名系统（DNS）服务器等］，由此达到自动设置主机 IP 地址的目的。IPv6 继承了 IPv4 的自动配置服务，并将其称为全状态自动配置。

除了全状态自动配置，IPv6 还采用了一种被称为无状态自动配置的服务。在无状态自动配置的过程中，首先主机通过将它的网卡 MAC 地址附加在链接本地地址前缀 1111111010 之后，产生一个链接本地单点广播地址（IEEE 已经将网卡 MAC 地址由 48 位改为 64 位，若主机采用网卡的 MAC 地址仍是 48 位，那么 IPv6 网卡驱动程序会根据 IEEE 的一个公式将 48 位 MAC 地址转换为 64 位 MAC 地址）。接着，主机向该地址发出一个被称为邻居探测（Neighbor Discovery）的请求，以验证地址的惟一性。如果请求没有得到响应，则表明主机自我设置的链接本地单点广播地址是惟一的；否则，主机将使用一个随机产生的接口 ID 组成一个新的链接本地单点广播地址。然后，以该地址为源地址，主机向本地链接中所有路由器多点广播一个被称为路由器请求（Router Solicitation）的数据包，路由器以一个数据包包含一个可聚合全局单点广播地址前缀和其他相关配置信息的路由器公告来响应该请求。主机用它从路由器得到的全局地址前缀加上自己的接口 ID，自动配置全局地址，然后就可以与 Internet 中的其他主机通信了。

使用无状态自动配置，无需手动干预就能够改变网络中所有主机的 IP 地址。例如，当企业更换了联入 Internet 的 ISP 时，将从新 ISP 处得到一个新的可聚合全局地址前缀。ISP 把这个地址前缀从它的路由器上传送到企业路由器上。由于企业路由器将周期性地向本地链接中的所有主机多点广播路由器公告，因此企业网络中所有主机都将通过路由器公告收到新的地址前缀，此后它们就会自动产生新的 IP 地址，并覆盖旧的 IP 地址。

14.6.2　IPv6 地址体系结构

1. IPv6 的地址结构和类型

（1）IPv6 的地址结构

128 位的 IPv6 地址由两个部分组成：长度均为可变的类型前缀和地址的其他部分。其结构如图 14-15 所示。



图 14-15　IPv6 的地址结构

可变长度的类型前缀部分定义了地址的目的，如单播、多播地址，保留地址，未指派地址等。第二部分就是地址的其他部分，其长度也是可变的。

IPv6 地址的数量极为巨大，理论上可提供 3.4×10^{38} 个地址。数量如此巨大的地址资源完全可以为未来网络体系中数量众多的各个节点提供用之不竭的 IPv6 地址，无需再去考虑怎样克服地址资源短缺的问题。

（2）IPv6 地址的类型

IPv6 数据报的目的地址有 3 种基本类型：单播、多播和任播。

1）单播是传统的点对点通信方式采用的地址。

2）多播是一点对多点的通信方式，IPv6 数据报发送到一组工作站的所有工作站。IPv6 将广

播看作多播的一个特例，在 IPv6 体制中没有定义广播类型的地址。

3）任播的目的站是一组计算机，但数据报在交付时只交付给其中的一个，通常是距离最近的一个。

在 IPv6 体系中，主机和路由器均称为节点。对于一个节点来讲，可能会使用多条不同的通信链路与别的节点相连，就会出现一个节点有与多个通信链路相连的接口。为 IPv6 给节点的每一个接口指派一个 IP 地址，一个节点可以有多个单播地址。

2. IPv6 地址的表示方法

（1）冒号十六进制记法

IPv4 地址采用点分十进制方式进行标记，而在 IPv6 体系中，IPv6 地址使用二进制表示位数达到 128 位，如果采用点分十进制进行标记已经十分不方便了，因此采用冒号十六进制记法。冒号十六进制记法是 IPv6 地址的基本表示方法，每个 IPv6 地址分成 8 个部分，每个 16 位的值用十六进制值表示，各值之间用冒号分隔。

如一个 IPv6 地址：59F3：AB62：FF66：CF7F：0000：1260：000E：DDDD，十六进制中，数字前面的 0 可以省略，简化表示，对于上面讲到过的 IPv6 地址中，0000 的前 3 个 0 可省略，缩写为 0；000E 的前 3 个 0 可省略，缩写为 E，此 IPv6 地址写为 59F3：AB62：FF66：CF7F：0：1260：E：DDDD，这种情况称为零省略。

（2）其他简单记法

1）零省略和零压缩：在 IPv6 地址的冒号十六进制记法中，除了“零省略”外，还有零压缩，即一连串连续的零可以用一对冒号代替。如 FB05：0：0：0：0：0：0：A25D，采用零压缩表示为 FB05：：A25D。

IPv6 规定，一个地址中零压缩只能使用一次。

2）冒号十六进制值结合点分十进制的后缀：一个使用冒号十六进制值结合点分十进制表示的一个 IPv6 地址为 0：0：0：0：0：0：128. 10. 15. 8。此处的冒号“：”分隔的是 16 位的值，而点分十进制的值是 8 位的值。再使用零压缩，即可得出：：：128. 10. 15. 8。

3）斜线表示法：IPv6 地址也可以使用斜线表示法来简单标记。如 68 位的前缀（不是类型前缀）56DB8235000000009 可记为 56DB：8235：0000：0000：9000：0000：0000：0000/68 或 56DB：8235：：9000：0：0：0：0/68 或 56DB：8235：0：0：9000：：/68。

14. 6. 3　IPv4 向 IPv6 的过渡

要想在短时间内将 Internet 和各个企业网络中的所有系统全部从 IPv4 升级到 IPv6 是不可能的。IPv6 与 IPv4 在 Internet 中长期共存是不可避免的现实。因此，实现由 IPv4 向 IPv6 的平稳过渡是导入 IPv6 的基本前提。确保过渡期间 IPv4 网络与 IPv6 网络互通是至关重要的。由于现实的原因，由 IPv4 向 IPv6 的过渡只能采用逐步演进实施的办法，同时还必须使新安装的 IPv6 系统能够兼容使用 IPv4 分组。

从 IPv4 向 IPv6 过渡的方法有两种：使用双协议栈和隧道技术。

1. 使用双协议栈过渡

（1）双协议栈

双协议栈是指在完全过渡到 IPv6 之前，使主机（或路由器）装有两个协议栈，一个 IPv4 和一个 IPv6，在此情况下，既可以接收、处理和转发 IPv4 数据报，也可以接收、处理和转发 IPv6 数据报。双协议栈主机（或路由器）既可以与 IPv6 的系统通信，又可以与 IPv4 的系统通信。

（2）双协议栈实施 IPv4 与 IPv6 系统之间通信的原理

使用双协议栈可实现 IPv4 与 IPv6 系统之间通信，同时也可以实现 IPv6 与 IPv4 系统之间的通

信。装有双协议栈的主机（或路由器）能够同时使用两种 IP 地址通信。即有两个 IP 地址，一个 IPv6 地址和一个 IPv4 地址。和 IPv6 主机通信时，是采用 IPv6 地址，和 IPv4 主机通信时，就采用 IPv4 地址。通过使用域名系统（DNS）来查询，如果 DNS 返回的是 IPv4 地址，双协议栈的源主机就使用 IPv4 地址发送 IPv4 数据报。但当 DNS 返回的是 IPv6 地址，源主机就使用 IPv6 地址发送 IPv6 数据报。注意 IPv6 数据报与 IPv4 数据报的相互转换是替换数据报的首部，数据部分不变。

使用双协议栈进行从 IPv4 到 IPv6 过渡的示意如图 14-16 所示。

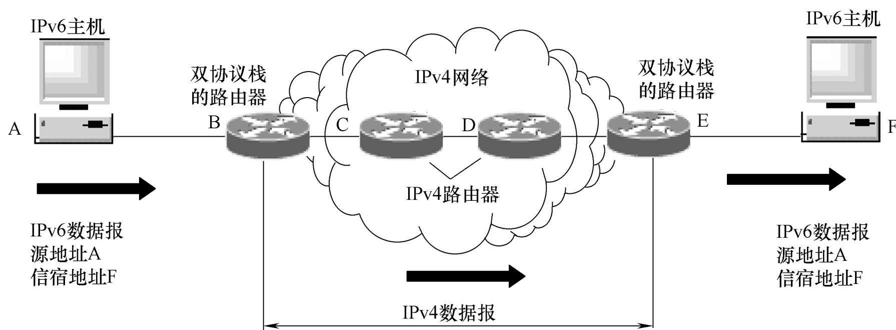


图 14-16　使用双协议栈实现 IPv6 系统和 IPv4 系统通信的示意图

2. 隧道技术

向 IPv6 过渡的另一种方法是隧道技术。基于 IPv4 隧道的 IPv6 是一种更为复杂的技术，是将整个 IPv6 数据报封装在 IPv4 数据报中，由此实现在当前 IPv4 网络中的 IPv6 节点与 IPv4 节点之间的 IP 通信。

使用隧道技术从 IPv4 到 IPv6 过渡的原理如图 14-17 所示。

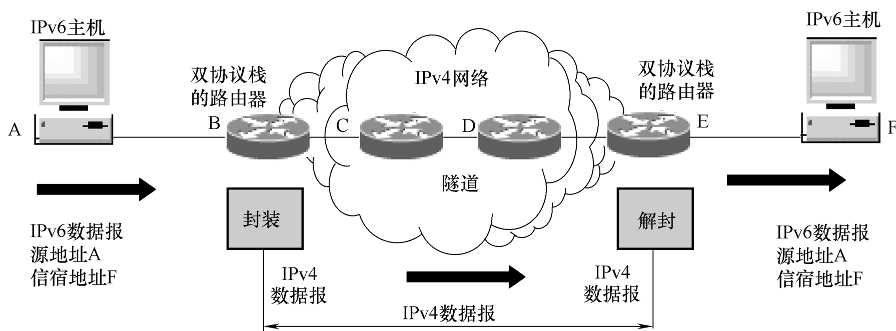


图 14-17　使用隧道技术从 IPv4 到 IPv6 过渡的示意图

隧道技术的实现过程分为封装、解封和隧道管理 3 个步骤。封装是指由隧道起始点创建一个 IPv4 数据报报头，将 IPv6 数据报装入一个新的 IPv4 数据报中，整个的 IPv6 数据报变成了 IPv4 数据报的数据部分。IPv6 数据报就在 IPv4 网络的隧道中传输。当 IPv4 数据报到达 IPv4 网络和 IPv6 网络的边界并离开 IPv4 网络中的隧道时，再将 IPv4 数据报中的数据部分（即原来的 IPv6 数据报）交给双协议栈的路由器，将 IPv6 数据报通过 IPv6 网络传输最后到达信宿节点 F。在数据报传输的路径上，从节点 B 到节点 E 就是传输隧道，路由器 B 是隧道的入口，而路由器 E 是出口。需要注意的是，在隧道中传送的数据报源地址是 B 而目的地址是 E。

解封是指由隧道终节点移去 IPv4 数据报报头，还原原始的 IPv6 数据报。隧道管理是指由隧道起始点维护隧道的配置信息。要使双协议栈的主机知道 IPv4 数据报里面封装的数据是一个 IPv6 数据报，IPv4 首部的协议字段的值必须设置为 41，专门用来表述数据报的数据部分是 IPv6 数据报。

IPv4 隧道有 4 种形成方法：路由器对路由器、主机对路由器、主机对主机及路由器对主机。

随着网络技术的飞速发展，IPv4 协议的地址容量小、承载 IPv4 协议的网络安全性差等缺陷逐渐暴露出来，由于 IPv6 与 IPv4 相比具有诸多的优越性，使得 IPv6 替代 IPv4 已经成为网络发展的必然趋势。但 IPv4 协议体系已有广泛的网络基础和应用基础，IPv6 协议体系作为后来者，必须提供完整的网络技术过渡方案和应用过渡方案才能够满足 IPv4 体系迁移到 IPv6 体系的要求。IPv4 向 IPv6 的过渡不可能在一个简单短暂的过程中完成，需要一个过渡阶段完成，可能这个阶段耗时还较长。

到目前为止，还没有一种机制能够适用于所有的情况，各种过渡机制都有其特定的适用环境。在部署 IPv6 网络的过程中，首先要明确应用的类型、范围和系统的类型，然后选择合适的过渡机制进行设计和实施。只有因地制宜、科学分析，才能更好地、更顺利地用最小的代价从 IPv4 网络体系逐步过渡到 IPv6 网络体系。

14. 6. 4 新技术对网络地址资源的需求和 IPv6

1. 物联网等新技术对网络地址资源的巨大需求

近年来兴起的物联网的英文名称是“The Internet of things”，物联网就是“物物相连的互联网”。物联网的核心和基础仍然是互联网，而且是在互联网基础上延伸和扩展的网络；物联网的用户端延伸和扩展到了任何物体与物体之间，进行信息交换和通信。所以将物联网定义为通过射频识别（RFID）、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物体与互联网相连接，进行信息交换和通信，以实现对物体的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。

人们已经熟悉的互联网是一个实现全球计算机互联和资源共享的超级网络，物联网是一个架构在互联网及许多有线、无线异构网络基础之上的“物物互联的网络”。

形形色色的智能终端在网络环境中进行通信，必须有一个被视为“网络身份证”的地址，那就是 IP 地址。网络技术的发展、移动互联网的发展、三网融合下的互联网拓展以及物联网应用的普及等，都需要大量的网络地址资源。据估计，仅仅移动互联网的地址需求预计将达到 5 亿 ~ 9 亿个，物联网的发展对 IP 地址资源的需求也极为巨大，IPv6 能够提供海量地址，完全可以满足以上技术发展的需求。

2. IPv6 体系的其他一些优点

下一代互联网协议 IPv6 除了具有地址资源数量极为巨大的优势外，为了便于路由汇聚和简化网络管理、配置和变更等，采用层次化、结构化的地址规划，IPv6 的地址分配机制一开始就遵循聚类的原则，这使得路由器能在路由表中用一条记录表示一片子网，大大减小了路由器中路由表的长度，即在 IPv6 体制下，路由等配置变得更小，使用更小的路由表，提高了路由器转发数据报的速度。

IPv6 体制增强了组播支持和对流的支持。这里的组播是一种允许一个或多个发送者组播源发送同一报文到多个接收者的技术，是满足高带宽需求的多媒体应用，缓解网络“瓶颈”问题的技术，在制定协议时保留了组播，取消了广播。

在 IPv6 体系中，对协议进行了改进和扩展，使得网络管理更加方便和快捷，安全性大幅度提升。网络用户可以对网络层的数据进行加密，并对报文进行校验，极大地增强了网络的安全性。此外，地址的充足性规避了动态地址的使用带来的不确定性。

目前，国内一些公司已经能够提供端到端的设备，支持主流的双栈、隧道及转换等演进策略，可以帮助运营商将现有的网络平滑过渡到 IPv6 网络。

对于新的 IPv6 网络体系，需要提前规划、尽早部署，使技术系统平滑、无缝地过渡到新的

网络体制。

14.6.5　BACnet 标准与 IPv6

BAS 的管理层网络使用基于 TCP/IP 的以太网，控制层可以使用以太网或工业以太网作为控制网络；BACnet 标准与 IP 网络技术有着深度的融合，随着发展，IPv6 网络体系已经走进社会生活、走进许多应用领域，走进工控和楼宇自控领域并和 BACnet 标准更紧密地结合在一起。

1. BACnet 标准与 IP 网络

BACnet 标准委员会（SSPC 135）的 IP 工作组开发的扩展性强但又不失灵活性的 BACnet 互联协议，是一个基于 IP 的 BACnet 协议，简称为“BACnet/IP”标准。BACnet/IP 标准将 BACnet 无缝地扩展到 IP 网络上，利用 IP 技术建立 BACnet，由于 BACnet 除了可以使用标准中明确支持的 5 种局域网传输数据报文外，从扩展的意义来讲，当然可以其他的局域网技术传输数据报文。这样一来，IP 网络也可以看作 BACnet 的局域网，并且建立在 IP 网络上的 BACnet 仍是一个 BACnet，是 BACnet 互连网络中的一个子网。BACnet/IP 直接支持基于 IP 的 BACnet 设备，用 IP 帧接收和发送 BACnet 报文，可以在 IP 网络上进行有效的 BACnet 广播，并允许在 IP 网络的任何位置动态地增加和减少 BACnet 设备。

BVLL 微协议层位于 BACnet 的网络层与 UDP 之间，其作用是进行 BACnet 广播管理，并提供向其他通信协议扩展的扩展机制。为了充分利用 IP 协议栈，扩展方式利用了 IP 用户数据报文（UDP）进行 BACnet 信息的传输。

BACnet 标准发布至今已经将近 20 年了，通信与网络技术、控制技术都在飞速地发展，尤其是以太网技术或 IP 网络技术凭借着诸多方面的巨大优势影响着各种各样已有的或发展迅速的有线或无线网络技术，BACnet 标准及技术是关于楼宇自控网络的标准与技术，因此以太网或 IP 网络技术的融入是一个很自然的进程。主要应用于 IP 网络的 IPv6 新体系必然会自然地取代 BACnet 应用系统中原有的 IPv4 体系。

2. IPv6 体系在 BACnet 标准中的应用

BACnet 标准在应用层能够灵活地扩展设备互操作功能，对负责通信的下层协议也有很强的扩展功能。互操作是 BACnet 标准的基本目标，通信只是传输互操作语义的工具，即网络层、数据链路层、物理层都是实现互操作目标的工具。只要 BACnet 定义的互操作语义不变，无论采取何种通信标准，均能够实现 BACnet 的功能。BACnet 的网络层与链路层之间只定义了一个标准接口（ ISO 8802. 2 Type 1），但是又没有定义具体的实现方式，这样就给出了实现方式的很大灵活性，也就是说，BA Cnet 实际上支持的网络可以使用许多现有的通信网络。ISO 8802. 2 是逻辑链路控制层的标准，它是在不同的媒体访问控制子层之上定义的一个公共接口。该层相对独立，其作用是屏蔽不同的媒体访问控制子层的差异，为网络层提供统一的界面。其中 ISO 8802. 2 Type 1 是不确认的 UDP 无连接服务，BACnet 可以构建于 IPv6 网络之上，其网络层可以通过接口与下层的 IPv6 网络进行通信。

在 BACnet/IP 体系结构中的设备应该和 BACnet 上的设备具有相同的通信方式和通信规程，即除了对等的设备能通信外，还应该能进行 BACnet 标准的广播，因为广播功能对楼宇设备很重要。但大多数 IP 网络为了防止网络拥塞，通常禁止广播，这就要在 BACnet 的网络层和下层通信协议之间定义一个新的协议层起到适配器的作用。这个新的协议层利用下层协议提供的功能，向 BACnet 的网络层提供服务，这就是 BVLL 层。BVLL 层在 BACnet 的网络层和下层通信协议之间起到一个接口的作用。

在 BACnet / IP 体系结构中，加入 UDP 层可以避免重新定义新类型的 IP 数据报，以便更好地利用已有的 IPv4 网络来建立 BACnet。因为在 IPv4 数据报文的报头中，第 8 个字段“传输协议”

用来表示此数据报文里封装的上层数据使用的是何种协议，例如上层如果是 UDP 的数据，则该字段就填入“17”，如果是 TCP 就填入“6”。IP 网络不能识别协议里没有定义的“传输协议”值，对于不能识别的协议值或用户自己重新定义的 IP 数据报，IP 路由器通常会将其丢掉。同样的道理，在 IPv6 的基本报头里也有这么一个字段，该字段叫“下一个报头”，该字段用来标示扩展报头或上层传输层所使用的协议。若在该字段填入“17”，同样表示 IPv6 数据报所封装的上层数据是 UDP 的数据。所以 BACnet / IP 在向 IPv6 扩展时，同样需要加入 UDP 层，这样上层的数据才可以利用 IPv6 网络来传输。

当 BACnet 标准的下层传输协议向 IPv6 进行扩展时，仍然可以利用 BACnet/IP 体系结构，而且 UDP 层和 BVLL 层也是需要的。即用 BVLL 的数据报来封装 BACnet 的网络层的数据报，用 UDP 的数据报来封装 BVLL 数据报，而用 IPv6 的数据报来封装 UDP 数据报，以便在 IPv6 网络上传输。

14.7　关于 BACnet 标准有待商榷的问题

传统的智能建筑技术在许多重要的方面并没有系统的理论作支撑，一般是直接将信息技术或控制理论和控制工程中的许多理论体系直接移植到建筑领域中来。随着 BAS 在发展和应用中表现出来的越来越多问题来看，不去系统地构建它的理论体系已经形成了阻碍楼宇自控技术和建筑智能化、信息化技术发展的瓶颈。因此建筑智能化、信息化技术在这方面就肩负着建立关于 BAS 和建筑智能化控制的系统理论任务。这些系统理论包括：使用通透以太网架构 BAS 的理论，基于 BACnet 协议的 BAS 理论，提高 BAS 开放性的理论等。

其中，由美国暖通空调和制冷工程师协会组织制定的 BACnet 协议发表距今已经 17 年了。制定协议的初衷是通过制定和推出 BACnet 协议，构建基于 BACnet 协议的 BAS，最大限度地提高 BAS 的开放性，使不同厂商生产的 BAS 的核心设备能够彼此互换互用、互联互通，并有优良的互操作性。

对于我国的业界，在深入理解、研究、消化和应用 BACnet 标准及技术方面还存在着很大不足以及一些认识不到位的问题。

1. 对 BACnet 标准研究、消化和应用的情况不理想

BACnet 协议颁布已经 17 年，2003 年就已经成为国际标准，并且早已经成为世界许多工业化国家的国家标准，但时至今日还不是我国的国家标准，这是一个令人遗憾的问题，并从侧面反映出国内业界对该标准的深入认识、研究和应用的不足。一个标准的应用一般都对应着相应的芯片技术、控制器技术的研究和开发，在这一点上，国内的业界迄今为止没有开发出具有重大意义且具备原创性的产品，在 BAS 产品方面，主要从事的是二次开发工作。要成为 BAS 的制造业大国，仅仅凭借二次开发和模仿是远远不够的，目前国内市场占有率较高的主要是国外的品牌产品佐证了这一点。

尽管在国内许多应用系统中声称使用了 BACnet 技术，在系统集成中使用了 BACnet 技术，怎么样提高系统的开放性并具备较先进的水平，但实际上大多数应用系统并不是真正意义上的 BACnet 系统，与 BACnet 标准关联度不高。

2. 在现有的技术水平上，是否已经实现互操作和优良的开放性这个初衷

17 年已经过去了，但制定 BACnet 协议用来解决 BAS 及其自控网络的开放性和互操作性这个初衷并没有完全实现。目前国内外几十种 BAS 产品，尽管其中的一部分宣称完全符合 BACnet 标准，但在实际应用过程中，这些系统的核心组件，如 DDC 彼此都不能互换、互用和互联互通，甚至各种不同品牌的产品彼此之间，中央监控主机的监控管理软件、DDC 的编程软件、架构系

统的楼宇自控网络都彼此互不相同，这样一来，所谓的开放性和互操作性就很有问题了。

3. 对 BACnet 标准认识的误区和修正

BACnet 标准的内容是冗长的，作为一个从事 BAS 或建筑弱电系统工程的工程技术人员，要想吃透 BACnet 标准的整个内容并深入理解和达到设计优良的 BACnet 应用系统的水平，是需要花费很大力气的。BACnet 标准先进并不是全部体现在该标准方方面面的具体内容上，而是体现在制定该标准的理念上，这个理念是：BACnet 标准必须随着相关的技术进步而发展，并相应地进行改变，要能够容纳和借鉴最新的技术为 BACnet 标准所用，正如同当初制定 BACnet 标准将以太网技术、LonWorks 和 ARCnet 技术融入标准一样，经过 17 年的时间，与 BACnet 标准相关的技术发展早已日新月异，许多新技术的出现和发展是当初参与制定 BACnet 标准的学者和工程师都没有经历过的，如无线传感器网络技术、物联网技术、万兆位以太网技术、工业以太网技术、实时以太网技术以及新出现的一些短距离无线网络技术和移动互联网技术等。因此发展 BACnet 标准就是要不断地将新发展起来的一些工程应用上已经成熟的网络通信技术，特别是控制网络技术都借鉴吸纳到标准的内涵中来。

4. 对 BACnet 标准进行修正应在哪几个方向进行

笔者认为，随着发展，如果要对 BACnet 标准进行修正，应该从以下方面进行：

1）标准的修正应该在广泛地吸纳业界内的工程技术人员、研究人员、生产厂商、研究界能够较好地透视未来，产业界能够将新技术在产品中实现，能够将关于未来的规划或设计具体实现，两者结合才能较好地把握现在和未来。

2）经过多年的发展，以太网技术、工业以太网和实时以太网技术在飞速发展，千兆位、万兆位和 10 万兆位的以太网技术越来越多的使用，业界公认以太网技术是有线网络发展的主流技术，使用 TCP/IP 的 IP 网络不仅在公众信息网络中占据主导地位，实现远程监控和远程连接的控制系统一般都要借助于 IP 网络来实现，就是说大量的测控网络如果要实现远程监控或者远程互联，使用 IP 网络作为互联平台或桥接网络有着巨大的优势。

要真正地实现 BAS 的互操作和真正的开放性，就要改变以往那些厂商各自为政地选用林林总总的控制总线来构建楼宇自控网络做法，采用标准化的做法，使用标准化的现场总线、工业以太网、实时以太网，通过标准化的网关，以 IP 网络为平台，实现 BAS 自控网络标准化和模块化。图 14-18 给出了一个使用 IP 网络为平台、标准化网关及不同的测控网络实现开放性及互操作性性能良好的 BAS 的原理示意图。

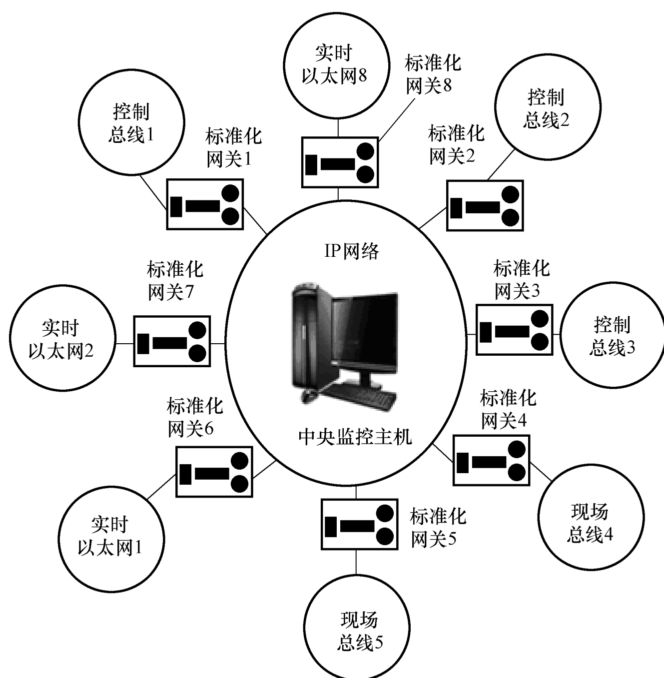


图 14-18　用 IP 网络、标准化网关实现良好的开放性及互操作性

图 14-18 中的标准化网关，如实现 ModBus 总线与 IP 网络互联的标准化网关；将 CAN 总线与 IP 网络互联的标准化网关；将 PROFINET 实时以太网与 IP 网络实现互联的标准化网关。

这里有几个问题需要注意：标准化网关是指采用标准化的方法生

产的制式网关，不同厂商生产的同类型网关能够互换、互用、互联、互通；标准化网关的复杂程度与要实现互联、互通的两种异构网络的异构程度有极大的关系，比如将 MS/TP 网络实现与 IP 网络的互联，要比将 Ethernet/IP 实时以太网与标准的 IP 信息网络互联的复杂程度低得多，MS/TP 协议标准与 TCP/IP 标准的异构性要比 Ethernet/IP 通信协议与 TCP/IP 标准的异构程度大得多。

3）开放楼宇自控网络技术使用的核心组件，如 DDC、标准化网关的底层源代码，只有实现了这些，进行二次开发的系统才会有很高的同构性，才能使 BAS 中的许多制式设备能够很好地互换、互用、互联、互通，真正实现 BACnet 设备彼此之间的互操作及较为理想的 BACnet 系统的开放性。

4）BACnet 标准的修正应该一改过去标准冗长复杂的情况，标准内容过于冗长和复杂，实际上对标准的应用形成了一个高门槛，大大增加了在实际工程应用中的难度。

5）BACnet 标准的修正内容应该最大限度地将现有的、在工程实际中已经颁布执行的成熟网络通信技术的标准融入，这里的网络通信技术包括信息网络、测控网络技术，同时也包括较新的工业以太网和实时以太网技术。这些技术和对应的标准融入 BACnet 标准体系，不是简单地单元式罗列进来，而是注重取舍、高度科学合理地融入，形成一个对产品研发和生产、实际工程设计、实施过程进行规范的高效能技术标准体系。

参 考 文 献

［1］ 武树斌，等. 采用改进的 RED 算法实现 BACnet 路由器拥塞控制［J］. 计算机工程与应用，2005.
［2］ http：//www. ccontrols. com. cn
［3］ 董春桥. 智能建筑自控网络［M］. 北京：清华大学出版社，2008.
［4］ 张公忠. 现代智能建筑技术［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2004.
［5］ 王廷尧. 以太网技术与应用［M］. 北京：人民邮电出版社，2005.
［6］ 张少军. 建筑智能化信息化技术［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
［7］ 王平，等. 工业以太网技术［M］. 北京：科学出版社，2007.
［8］ 张少军. 无线传感器技术及应用［M］. 北京：中国电力出版社，2010.
［9］ 陈志新，张少军，等. 楼宇自动化技术［M］. 北京：中国电力出版社，2009.
［10］ 王再英，等. 楼宇自动化系统原理及应用［M］. 北京：电子工业出版社，2005.
［11］ 陈龙. 智能建筑楼宇控制与系统集成技术［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2004.
［12］ 杜明芳. 智能建筑系统集成［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
［13］ 陈在平. 现场总线及工业控制网络技术［M］. 北京：电子工业出版社，2008.
［14］ 谢昊飞. 网络控制技术［M］. 北京：机械工业出版社，2009.
［15］ 任作新. 网络化监督与控制系统［M］. 北京：国防工业出版社，2007.
［16］ 阳宪惠. 现场总线技术及其应用［M］. 北京：清华大学出版社，1999.
［17］ 梅英，等. 基于 BACnet 的楼宇自控系统工程设计［J］. 低压电器现代建筑电气篇，2008（4）.
［18］ 缪学勤. 基于国际标准的十一种工业实时以太网体系结构研究［J］. 仪器仪表标准化与计量，2009.
［19］ 杜品圣. 工业以太网和工业实时以太网的安装、调试和诊断技术［J］. 自动化博览，2007.
［20］ 李冬辉，等. 智能楼宇开放网络协议 BACnet/IP 浅析［J］. 低压电器，2004.
［21］ 方义，等. BACnet 与 Internet 的互联［J］. 北京航空航天大学学报，2005.
［22］ 齐涛，等. BACnet/IP 通信协议解析［J］. 智能建筑与城市信息，2007（2）.
［23］ 聂晓波，等. ARCnet 网络系统实时性性能分析与研究［J］. 铁道学报，2011.
［24］ http：//2012. chuandong. com/
［25］ http：//www. bacnetunion. com/BACnet 中国技术联盟
［26］ 黄晓峰，等. 基于 BAS 的 LonWorks 与 BACnet 网关设计［J］. 微型电脑应用，2004，20（7）.
［27］ 汪东生. 基于蓝牙技术的 BACnet 网络接入研究［J］. 武汉理工大学学报：信息域工程管理版，2007（10）.
［28］ 董春桥，袁博. 楼宇自控系统集成技术及发展方向［J］. 智能建筑与城市信息，2005（12）.
［29］ 梅英，等. 基于 BACnet 的楼控系统设计［J］. 低压电器现代建筑电气篇，2008（4）.
［30］ Delta 控制公司. 应用 BACnet 协议的控制器［J］. 智能建筑与城市信息，2006（7）.
［31］ 吴彬. 新一代 BACnet 控制器［J］. 智能建筑与城市信息，2007（5）.
［32］ 聂佳，等. ZigBee 与 BACnet 互联机制的研究［J］. 低压电器现代建筑电气篇，2008（22）.
［33］ 衣卓. ZigBee 无线网络技术在 Lonworks 与 BACnet 系统中的扩展应用［J］. 智能建筑与城市信息，2007（3）.
［34］ 袁博，董春桥. 基于 BACnet/Web Servicesde 楼宇自控系统的开发［J］. 智能建筑，2007（6）.
［35］ 梅英，等. 基于 BACnet 的楼控系统设计［J］. 低压电器现代建筑电气篇，2008（4）.
［36］ 王焕新. IP 技术在智能建筑中的应用［J］. 工程设计 CAD 与智能建筑，2001（6）.
［37］ 梁华，等. 基于 TCP/IP 的 BACnet 网络的实现［J］. 计算机与数字工程，2004（3）.
［38］ 陈宇翔，等. 基于 BACnet 协议的智能建筑系统集成的实现［J］. 智能建筑与城市信息，2006（2）.
［39］ 颜小军，等. 基于 BACnet 协议的楼控系统集成设计与实现［J］. 智能建筑与城市信息，2006（3）.

[40] 聂佳，等．XML 技术在 BACnet 中的应用［J］．智能建筑与城市信息，2004（11）．

[41] 董春桥．智能楼宇 BACnet 原理与应用［M］．北京：电子工业出版社，2003.

[42] 谢希仁．计算机网络［M］．2 版．北京：电子工业出版社，1999.

[43] 张云勇，刘韵洁．基于 IPv6 的下一代互联网［M］．北京：电子工业出版社，2004.

[44] 杨铁雷，等．关于 BACnet 的下层通信网络向 IPv6 扩展的分析［J］．建筑电气，2007（3）．

[45] 王树东，靳雷，高敬更，等．基于工业以太网和无线通信的水厂 SCADA 系统［J］．电气传动，2009，39（6）．

[46] 方向前，等．基于以太网技术的局域网系统传输性能测量方法［J］．中原工学院学报，2005，16（6）．

[47] IEEE Std：802. 15. 4-2003，Wireless Medium Access Control（MAC）and Physical Layer（PHY）Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks（LR-WPANs）．





ISBN 978-7-111-38144-0

策划编辑：林春泉

封面设计：路恩中

上架指导：工业技术／智能建筑技术

地址：北京市百万庄大街22号

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



定价：68.00元